

# Dateiübertragung mittels digital modulierter Hochfrequenzsignale: Messung und Bewertung

Masterthesis von  
Alessandro Haist  
Matr.-Nr.: 195231

Betreuer:  
Prof. Dr.-Ing. Martin Alles  
Prof. Dr. rer. nat. Nikolas Akerblom

Heilbronn, 15.11.2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlagen zur drahtlosen Signalübertragung . . . . .	3
2.2	Modulation . . . . .	3
2.3	Vektormodulation . . . . .	4
2.4	Vektorsignale und Konstellationsdiagramm . . . . .	4
2.5	Phasenumtastung - PSK . . . . .	5
2.6	Quadraturamplitudenmodulation - QAM . . . . .	6
2.7	Symbolmapping . . . . .	7
2.8	Differentielle Mappings . . . . .	8
2.8.1	DQPSK . . . . .	9
2.8.2	DQAM . . . . .	9
2.9	Versuchsaufbau zur digitalen Drahtlosübertragung . . . . .	10
2.10	Erzeugung digitaler HF-Signale mit dem R&S SMJ100A . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Funktionsweise des Signalanalysators R&amp;S FSQ8</b>	<b>14</b>
3.1	Analoger Abschnitt . . . . .	15
3.2	Digitaler Hardware Abschnitt . . . . .	15
3.3	DSP Abschnitt . . . . .	17
3.4	Modulation Accuracy . . . . .	18
3.4.1	EVM . . . . .	19
3.4.2	Magnitude Error . . . . .	19
3.4.3	Phase Error . . . . .	19
3.4.4	Carrier Frequency Error . . . . .	20
3.4.5	Origin Offset . . . . .	20
3.4.6	Gain Imbalance . . . . .	21
3.4.7	Quadrature Error . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Aufbau einer MATLAB-Software zur automatischen Dateiübertragung</b>	<b>23</b>
4.1	Verwendung des R&S MATLAB Toolkit für Signal- generatoren und Ana- lyzer . . . . .	25
4.2	Gliederung der Programmstruktur . . . . .	25
4.3	Funktion Gesamtdatei . . . . .	26
4.4	Funktion Init_Freq_ext_QAM . . . . .	26
4.5	Funktion Init_Freq_int_QAM . . . . .	27
4.6	Funktionen Init_Freq_ext_QPSK und Init_Freq_int_QPSK . . . . .	28
4.7	Funktion imread . . . . .	28

4.8	Ermittlung der Grafikgröße und Anzeige eines Kontrollfensters zur Bildübertragung . . . . .	28
4.9	Funktion Bild_einlesen . . . . .	29
4.10	Funktion Aufteilen_Senden_Empfangen . . . . .	33
4.11	Funktion Senden . . . . .	37
4.12	Funktion Empfang_FSQ8 . . . . .	39
4.13	Funktion Mod_Accuracy . . . . .	39
4.14	Funktion Sortierung_vollst . . . . .	41
4.15	Funktion Bildrekonstruktion . . . . .	42
4.16	Funktion Fehlerauswertung . . . . .	45
4.17	Anzeige des empfangenen Bildes . . . . .	46
4.18	Ausgabe einer Tabelle zur Übertragungsgenauigkeit . . . . .	46
4.19	Programmablauf mit blockweiser Überprüfung der Initialfolge . . . . .	46
4.20	Programmablauf ohne Sortierung . . . . .	47
4.21	Bildübertragung mit abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur . . . . .	48
4.21.1	Funktion Gesamtdatei_4Sym16QAM . . . . .	49
4.21.2	Funktion Aufteilen_Senden_Empfangen_4Sym16QAM . . . . .	49
4.21.3	Funktion Sortierung_4Sym_16QAM . . . . .	50
4.21.4	Funktion Fehlerauswertung_4Sym16QAM2 . . . . .	51
4.21.5	Funktion Accuracy_table4Sym . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Dokumentation der Übertragungen und Messungen</b>	<b>53</b>
5.1	Variation des Leistungspegels am Signalgenerator R&S SMJ100A . . . . .	53
5.1.1	Variation der Sendeleistung bei einer Antennenübertragung . . . . .	53
5.1.2	Variation der Sendeleistung bei einer Kabelübertragung . . . . .	54
5.2	Variation der Modulationsart . . . . .	58
5.3	Variation der Symbolrate . . . . .	62
5.4	Messungen mit interner Referenzfrequenz . . . . .	65
5.5	Übertragung von Einzelpunkten . . . . .	68
5.5.1	Überprüfung des Einflusses der Trajektorienform . . . . .	68
5.5.2	Beurteilung der Übertragungsqualität bei Symbolwiederholungen	71
<b>6</b>	<b>Optimierung der Signalkonstellation</b>	<b>73</b>
6.1	Beschreibung des Grundproblems . . . . .	73
6.2	Herleitung der Fehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	74
6.3	Numerische Lösung des Ausdrucks der Fehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	75
6.4	Geometrische Interpretation der Lösung . . . . .	76
6.5	Erzeugung benutzerdefinierter Signalkonstellationen . . . . .	80
6.6	Vergleichsmessung von 8-Punkt-Konstellationen mit dem Signalgenerator Agilent EXG N5172B . . . . .	83

6.7	Modulation bekannter 8-Punkt-Konstellationen mit dem Signalgenerator R&S SMJ100A . . . . .	84
<b>7</b>	<b>Übertragung verschiedener Dateitypen</b>	<b>88</b>
7.1	MATLAB-Bilddatenformat . . . . .	89
7.2	Windows Bitmap . . . . .	89
7.3	Testmanipulation des Bitmap-Headers mit MATLAB . . . . .	91
7.4	Übertragung einer BMP-Datei . . . . .	94
7.5	Übertragung einer BMP-Datei mit RLE-Komprimierung . . . . .	98
7.6	Übertragung einer JPEG-Grafik . . . . .	102
7.7	Übertragung einer PNG-Datei . . . . .	106
7.8	Übertragung einer Excel-Datei (.xlsx) . . . . .	107
7.9	Übertragung einer Text-Datei (.txt) . . . . .	108
<b>8</b>	<b>Messungen mit benutzerdefinierten Filtern</b>	<b>112</b>
8.1	Intersymbolinterferenz (Symbolübersprechen) . . . . .	112
8.2	Verwendung von ISI-Filter . . . . .	112
8.3	Einstellung benutzerdefinierter Filter . . . . .	112
<b>9</b>	<b>Übertragungen ohne Trigger-Leitung</b>	<b>116</b>
9.1	Grundlagen zur Synchronisation . . . . .	116
9.2	Unterschiede zwischen Praxisfall und Versuchsaufbau . . . . .	116
9.3	Synchronisation durch Leistungsspitzen im Sendesignal . . . . .	117
9.4	Synchronisation durch Leistungsabschaltung im Sendesignal . . . . .	119
9.5	Bildübertragung mit Triggerung durch Sendeleistung . . . . .	119
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>122</b>
10.1	Übertragungshardware . . . . .	122
10.2	Dateiformate . . . . .	122
10.3	Optimierte benutzerdefinierte Signalkonstellation . . . . .	123
10.4	Kurzanleitung . . . . .	124



# 1 Einleitung

## Motivation

Die meisten Internetzugriffe erfolgen heute über das Smartphone. Während vor dem Jahr 2010 überwiegend der PC dafür verwendet wurde, nutzten 2016 81% aller Internet-User ein Mobiltelefon für den Online-Zugang [1]. Die digitale Modulation von HF-Signalen ist dabei immer von Bedeutung, unabhängig ob WLAN oder ein Mobilfunkstandard, wie LTE angewandt wird. Die Weiterentwicklung drahtloser Kommunikationstechnik für das Internet erscheint als interessante Alternative zur leitungsbasierten Anbindung an das Breitbandnetz. Der Ausbau mit Glasfaserkabeln ist kostenintensiv, zeitaufwendig und bei der Versorgung abgelegener Orte für den Provider unrentabel. Aus technischer Sicht können drahtlose Anbindungen sogar zu einer Verringerung zeitlicher Verzögerungen führen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist in Luft höher als in Kupfer oder Glas [2]. Das Mobilfunknetz ist allerdings nicht zur flächendeckenden Internetversorgung von PCs vorgesehen. Alle Online-Zugriffe durch Mobilfunk in einem bestimmten Gebiet erfolgen über die selbe Funkzelle einer Basisstation. Bei gleichzeitiger Benutzung durch viele Teilnehmer, reduziert sich die Datenrate merklich. Einige Mobilfunkbetreiber verbieten rechtlich die ausschließliche Nutzung des Mobilfunk-Internets für PCs [3]. Die Zugangskosten für den Verbraucher sind deutlich teurer als bei DSL. Zudem existieren kaum Tarife für unbegrenzten Zugang. Genauso wie beim Leitungsnetz sind lokale Schwankungen der Internetgeschwindigkeit vorhanden. Während beim Kabelzugang die Geschwindigkeit vorherbestimmt werden kann, ist sie beim Mobilfunk individuell auszutesten. Notebooks und Desktop-PCs besitzen in der Regel keine Empfangseinrichtung für Mobilfunk. LTE-Router übersetzten das Protokoll in den WLAN-Standard. Diese Umwandlung erfolgt durch separate Geräte oder als integrierte Funktion in einem Smartphone (Hotspot). Einige dieser Router bieten auch einen Kabelzugang zum PC, um die Verluste der WLAN-Verbindung zu vermeiden. Sie werden häufig in Form von USB-Sticks angeboten. Die private Nutzung des Mobilfunk-Internets für PCs ist also mit Einschränkungen verbunden. Für Unternehmen ist dies meist nicht hinnehmbar. Die geschilderten Hindernisse bedeuten allerdings nicht, dass das Internet grundsätzlich leitungsgebunden vermittelt wird und in drahtlose Online-Technologien zukünftig keine Investitionen fließen. Die Richtfunkanbindung von Basisstationen erfolgt, wenn sich das Verlegen von Leitungen nicht lohnt (Abbildung 1). Die Umwandlung im Großen ähnelt dem Prinzip der privaten Hotspots. Eine Richtfunkantenne empfängt die gebündelte elektromagnetische Energie. Nach der Umwandlung senden mehrere Sektorantennen mit Rundstrahlcharakteristik die Wellen in das Umfeld des Masts. Außerdem ist die weitere Übertragung nach einer Richtfunkstrecke durch ein Kabel möglich. Dementsprechend kann das Internet über Richtfunkabschnitte zum Verbraucher gelangen, auch wenn es schließlich beim Router über ein Kabel ankommt.



Abbildung 1: Kombination aus Mobilfunk-Basisstation (Sektorantennen) im oberen Teil und Richtfunk im unteren Teil [4]

Drahtlose Internet-Übertragung ist also von großer Bedeutung, auch wenn nur bestimmte Abschnitte betroffen sind. Es ist lohnenswert Technologien in diesem Feld weiterzuentwickeln, um Reichweite, Geschwindigkeit, Signalqualität, Verfügbarkeit und Sicherheit zu verbessern.

## Aufgabenstellung

In dieser Arbeit geht es zunächst darum, Grafiken mittels digital modulierter HF-Signale drahtlos zu übertragen. Des Weiteren soll die Übertragung verschiedener Dateitypen, wie komprimierte Bilder oder Textdateien stattfinden. Es soll ausführlich die Signalqualität beurteilt werden und eine Analyse erfolgen, wie sich unterschiedliche Einflussgrößen auswirken, so z.B. Sendeleistung, Symbolrate und Modulationsart. Bei der Modulation soll überprüft werden, wie sich benutzerdefinierte Konstellationen auf die Qualität auswirken. Es soll untersucht werden, welche Bedeutung dabei die Signaltrajektorie hat und wie Symbolwiederholungen die Fehlerrate beeinflussen. Es soll dargestellt werden, wie eine Korrektur des Empfangssignals aussehen kann und welchen Einfluss Filter haben. Zudem soll gezeigt werden, wie vorgegangen werden kann, um Daten ohne Trigger- und Frequenzleitung zu übertragen. Außerdem soll untersucht werden, wie Dateiformate und Übertragungsqualität zusammenhängen. So kann getestet werden, wie empfindlich diese Formate auf Symbolfehler reagieren und welche Kompressionsart den günstigsten Einfluss hat.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Grundlagen zur drahtlosen Signalübertragung

Ein Übertragungssystem überträgt Informationen von einer Quelle zu einer Senke [6]. Diese allgemeine Definition enthält keine Angaben zur technischen Umsetzung. Für eine elektronische Übertragung per Kabel sind die Informationen durch einen Sender in analoger oder digitaler Form in ein Spannungssignal umzusetzen. Diese Umwandlung wird Codierung genannt. Eine rückwärtige Signalumsetzung erfolgt beim Empfänger, die Decodierung. Zur drahtlosen Signalübertragung werden elektromagnetische Wellen im Freiraum genutzt. Dabei kommt eine Antenne zum Einsatz, eine Einrichtung, die drahtgebundene elektromagnetische Wellen in Freiraumwellen umwandelt und umgekehrt. Für die drahtlose Übertragung findet eine Modulation des Signals statt, die in einem separaten Absatz noch genauer behandelt wird.

### 2.2 Modulation

Die Veränderung eines Trägersignals zur Übertragung eines Nutzsignals wird als Modulation bezeichnet. Das niederfrequente Nutzsignal wird dabei Basisbandsignal genannt [5]. Die Frequenz des Trägers ist wesentlich höher als die des Basisbandsignals. Beim Prozess der Demodulation wird das Nutzsignal aus einem modulierten Signal wieder zurückgewonnen. Die Notwendigkeit einer Modulation kann physikalisch und technisch begründet werden.

Das Ausbreitungsverhalten elektromagnetischer Wellen ist u.a. durch die Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt, welche sich aus der Frequenz  $f$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  berechnen lässt (Gleichung 1). Im Vakuum entspricht die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Ein besonderes Ausbreitungsverhalten ist bei Mittelwellen zu beobachten. Als Mittelwellen werden elektromagnetische Wellen bezeichnet, die eine Wellenlänge zwischen 100 m und 1000 m aufweisen. In die Erdatmosphäre abgestrahlte Mittelwellen werden an der Ionosphäre reflektiert. Sie werden als Raumwellen bezeichnet, breiten sich geradlinig aus und ermöglichen Fernübertragungen. Die Bodenwellen hingegen folgen der Krümmung der Erdoberfläche und sind reichweitenbeschränkt [6]. Eine Mittelwellenmodulation kann also den Zweck erfüllen, die Reichweite zu optimieren.

Die Länge von Dipolantennen soll der halben Wellenlänge des Signals entsprechen. In diesem Fall weist die Antenne eine Resonanzfrequenz auf, die identisch zur Signalfrequenz ist [7]. Eine Längenverkürzung erhöht beispielsweise die Resonanzfrequenz. Die

Antenne sollte nahe der Resonanzfrequenz betrieben werden. Daher erfordern niedrige Sendefrequenzen lange Antennen und umgekehrt. So erlaubt die Modulation auf einen Mikrowellenträger ( $\lambda < 300 \text{ mm}$  [8]) die Verwendung kleiner Antennen. Ein analoges Audio-Signal im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 20 kHz besitzt ohne Modulation auf einen höherfrequenten Träger eine maximale Wellenlänge von 18 750 km. Diese Wellenlänge ergibt sich nur, wenn sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Im Folgenden wird einfachheitshalber mit einer Lichtgeschwindigkeit von  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  gerechnet.

$$\lambda(16 \text{ Hz}) = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{16 \text{ Hz}} = 18\,750\,000 \text{ m} = 18\,750 \text{ km} \quad (2)$$

Ein weiterer Nutzen der Modulation besteht in der Möglichkeit zum gleichzeitigen Senden auf verschiedenen Frequenzen. Nur auf diese Weise ist ein paralleles Funktionieren verschiedener Übertragungssysteme denkbar. Ein weiterer Vorteil liegt in der Realisierung diverser Multiplex-Verfahren. Hierbei werden mehrere Datenströme mithilfe eines Trägers übermittelt.

## 2.3 Vektormodulation

Die Signalmerkmale Frequenz, Amplitude und Phase lassen sich verwenden, um Informationen zu übertragen. Die Bandbreitenausnutzung lässt sich steigern, indem mehrere Größen gleichzeitig verwendet werden. Amplitude und Phase lassen sich in einem Vektor zusammenfassen. Diese Vektormodulation gibt es in analoger und digitaler Ausführung.

## 2.4 Vektorsignale und Konstellationsdiagramm

In der Vektorsignalanalyse werden Signale häufig in einem Konstellationsdiagramm dargestellt. Dieses Diagramm ist eine angepasste komplexe Zahlenebene. Hierin lassen sich zugleich ein Polar- und ein kartesisches Koordinatensystem anwenden. Die Realteilachse (x-Achse) wird als I-Achse bezeichnet und die Imaginärteilachse (y-Achse) als Q-Achse. Allgemein transformiert die Eulerformel komplexe Zahlen zwischen Polar- und kartesischer Form. Die kartesische Form entspricht einer komponentenweisen Darstellung des Signals in I und Q. Die beiden Komponenten stehen senkrecht aufeinander. Die Polarform gibt Phasenwinkel und Amplitude (Betrag) eines Gesamtsignals an, das dem Summenvektor entspricht. Im Konstellationsdiagramm sind immer beide Darstellungsformen möglich, unabhängig der technischen Umsetzung. So werden in manchen Systemen die Daten in Teilströme getrennt, komponentenweise moduliert und wieder zusammengeführt. Entsprechend verhält es sich mit der Demodulation: Das Gesamtsignal wird in seine Komponenten aufgeteilt, aus denen zwei Teilströme an Daten zurückgewonnen und in einem Gesamtstrom zusammengefasst werden. Diese Struktur ist bei QAM sinnvoll.

## 2.5 Phasenumtastung - PSK

Bei der Phasenumtastung (PSK - engl. phase shift keying) werden Informationen durch die Phasenlage eines Signals ausgedrückt. Gegenüber der analogen Phasenmodulation kann die digitale Phasenumtastung nur diskrete Werte für den Phasenwinkel annehmen. Bei BPSK (binary phase shift keying) sind nur 2 Zustände möglich. Dennoch kann eine Darstellung im Konstellationsdiagramm erfolgen. Bei der Darstellung von PSK befinden sich alle Punkte auf einem Kreis um den Koordinatenursprung. Der Radius, welcher der Amplitude entspricht, ist 1. Jedem Punkt wird ein Symbol zugeordnet. Bei einem Symbol handelt es sich um eine informationstechnische Einheit. Der Begriff Bit (binary digit) wird hier nicht verwendet, da je nach Modulationsgrad mehr als 2 Zustände möglich sind. Gängige Ausführungen von PSK sind BPSK, QPSK (quadrature phase shift keying, 4 Symbole) und 8PSK (8 Symbole). Größere Modulationsgrade sind zunehmend störanfällig.

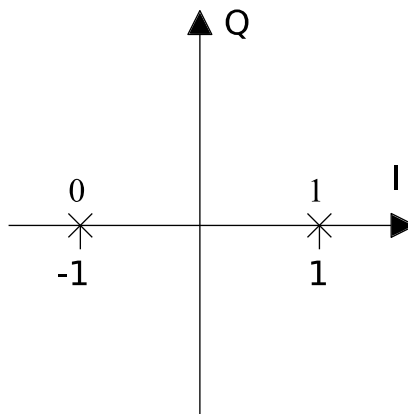


Abbildung 2: BPSK im Konstellationsdiagramm mit 2 erlaubten Zuständen

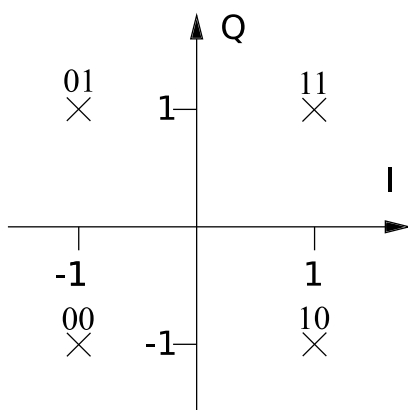


Abbildung 3: QPSK im Konstellationsdiagramm mit 4 erlaubten Zuständen

## 2.6 Quadraturamplitudenmodulation - QAM

Die Quadraturamplitudenmodulation verbindet Amplituden- und Phasenmodulation. Im Konstellationsdiagramm können Symbolpunkte dabei unterschiedliche Abstände zum Koordinatenursprung aufweisen. Die QAM existiert in analoger und digitaler Ausführung. In dieser Arbeit soll der Fokus auf die digitale QAM gerichtet werden, die auch Amplituden-Phasen-Umtastung genannt wird [25]. Das Zustandekommen der Konstellationspunkte soll anhand von 16QAM erklärt werden. Wie bei PSK können die Einzelkomponenten I und Q nur Phasenwinkel von  $0^\circ$  und  $180^\circ$  besitzen. Eine Komponente kann 2 positive Amplitudenwerte annehmen. Diese Amplitudenwerte können zusammen mit einem Phasenwinkel von  $180^\circ$  auftreten. Anders ausgedrückt handelt es sich um die beiden verfügbaren Amplitudenwerte mit negativem Vorzeichen. So sind je Komponente bzw. je Achse 4 Zustände erreichbar (Abbildung 4). Aus der Kombination zweier Komponenten dieser Art resultieren 16 Symbole. QAM-modulierte Signale lassen sich auch komponentenweise durch 2 separate Zeit-Diagramme darstellen. Zur Erzeugung eines Vektorsignals ist der Datenstrom in 2 Teilströme zu trennen. Der erste Teilstrom wird mittels multiplikativer Mischung auf einen Kosinus-Träger moduliert. Da keine Phasenverschiebung vorliegt, wird diese Komponente I genannt (In-phase). Der zweite Teilstrom wird auf einen invertierten Sinus-Träger moduliert. Dies entspricht einer Phasenverschiebung gegenüber dem ersten Träger um  $90^\circ$ . Die Komponente wird Q genannt (Quadrature). Die Komponenten werden mittels Vektoraddition zusammengeführt (siehe Abbildung 5). Gängige Modulationsgrade sind 16-, 32-, 64-, 128- und 256QAM. Alle Konstellationsumfänge, die keiner Quadratzahl entsprechen, lassen sich durch Wegnahme von Eckpunkten erzielen.

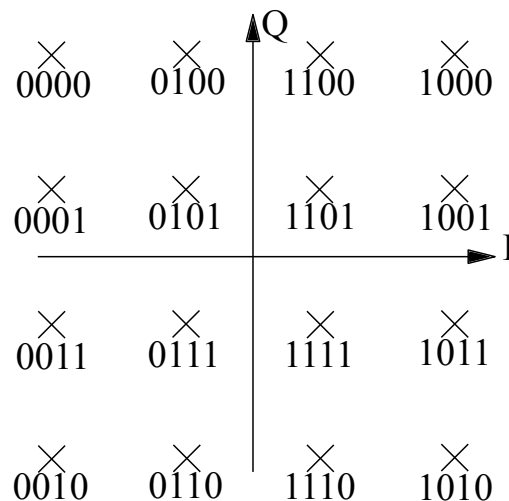


Abbildung 4: 16QAM im Konstellationsdiagramm

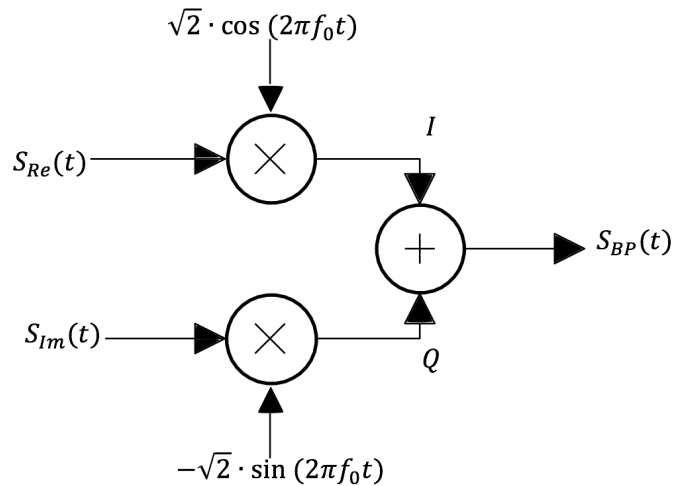


Abbildung 5: Komponentenweise Erzeugung einer Quadraturamplitudenmodulation

## 2.7 Symbolmapping

Das Symbolmapping ordnet den Konstellationspunkten Symbole zu. Es ist zu unterscheiden von der Festlegung der Koordinaten dieser Punkte. Die Mapping-Einstellungen von Signalgenerator und -analysator müssen konsistent sein. Gängige Mappings sind “Binary“ und “Gray-Code“. Bei “Binary“ verläuft die wertaufsteigende Symbolfolge spaltenweise von oben nach unten und von links nach rechts. Bei “Gray-Code“ besteht zu allen benachbarten Symbolen ein Hamming-Abstand von 1. D.h., dass sie sich nur in einer binären Ziffer unterscheiden. Bei manchen Mappings wird das Ziel verfolgt, bestimmte Trajektorien zu erzeugen oder zu vermeiden. Bei der Messung benutzerdefinierter Konstellationen wurde festgestellt, dass Trajektorien, die geradlinig durch mehrere Punkte gehen, störanfällig sind. Verläuft die Trajektorie an jedem Punkt über einen spitzen Winkel, so konnte der Analysator das Signal am besten rekonstruieren. Diese Merkmale bringen aber auch Nachteile mit sich. So führen Unstetigkeiten zur Entstehung störender Oberwellen. In der Praxis hat das Symbolmapping nur einen geringen Qualitätseinfluss. Information wird ausschließlich durch stochastische Signale übertragen. Die Trajektorien sind beliebig, die Symbolabfolge ist zufällig. Es können nicht nur Daten übertragen werden, die günstige Trajektorien erzeugen.

Für eine korrekte Analyse sollte die Signaltrajektorie möglichst frühzeitig den ganzen Konstellationsbereich abfahren. Bei kleinen Konstellationen wie 16QAM ist dies schon mit wenigen Übertragungssymbolen erreicht. Bei 256QAM war die Übertragung von ca. 30 000 Symbolen notwendig, um alle Zustände zu erreichen. Hierbei empfiehlt es sich, mit einer ansteigenden Symbolfolge alle Werte zu durchlaufen, um das System zu kalibrieren. Je größer die Anzahl definierter Zustandspunkte, desto umfangreicher wird

die dafür benötigte Datenmenge. Um ohne Initialfolge korrekt zu analysieren, müssen die übertragenen Symbolwerte statistisch gleich verteilt sein. Zudem sollte die Aufzeichnungslänge mindestens der 8-fachen Punktezahl entsprechen [14]. Beispielsweise sollen von einem 16QAM-Signal mindestens 128 Symbolen in den Aufnahmespeicher geschrieben werden. Zur Entstehung von Demodulationsfehlern kann es auch kommen, wenn alle Symbole sich in einem Quadranten befinden oder die gleiche Amplitude aufweisen, d.h. den gleichen Abstand zum Koordinatenursprung.

Bei den voreingestellten QAM-Konstellationen des Analyzers handelt es sich um das Mapping DVB-C (Digital Video Broadcasting Cable). Anhand von 16QAM soll dieses Mapping beschrieben werden. Die Symbole werden in ansteigender Wertfolge behandelt. Die Werte 0x0 bis 0x3 liegen im ersten Quadranten. Die Trajektorie hat einen "Zick-Zack-Verlauf". Der nächste Quadrant mit den Werten 0x4 bis 0x7 wird durch eine Rotation um  $-\pi/2$  erreicht (Quadrant IV). Mit einer Rotation um  $+\pi$  gelangt man zum nächsten Quadranten für die Werte 0x8 bis 0xB (Quadrant II). Die Werte 0xC bis 0xF im nächsten Quadranten werden durch eine Rotation um  $+\pi/2$  erreicht (Quadrant III). Da der Analyzer keine absoluten Phasenlagen sondern nur Veränderungen erkennen kann, ist die Ausgangsposition des ersten übertragenen Symbols nicht bekannt. Wenn die oben beschriebenen Bedingungen zu Symbolumfang und -verteilung eingehalten werden, ist die Rekonstruktion einer Trajektorie relativ zu ihrem Anfangspunkt möglich. Die relative Anordnung der Quadranten zueinander ist unverändert. Die absolute Lage der gesamten Anordnung kann jedoch rotiert sein. Die Quadranten sind also nicht vertauscht. Rotationswinkel und Quadrantenübergänge sind feststellbar. Außerdem kann die Lage eines Konstellationspunktes innerhalb eines Quadranten richtig erkannt werden. Der Analyzer wählt den Anfangsquadranten zufällig aus. Für eine Korrektur im Fall einer Rotation ist es nötig, ein Symbol des ersten Quadranten zu übertragen. Aus dem Empfangssymbol lässt sich erkennen, ob eine Rotation stattgefunden hat und falls zutreffend, um welchen Winkel. 4 Zustände für die Quadrantenanordnung können dabei auftreten. Symbole des ersten Quadranten können um folgende Winkel rotiert sein: 0;  $\pi/2$ ;  $\pi$ ;  $3\pi/2$ . Im Programmteil wurden verschiedene Rotationskorrekturen implementiert.

## 2.8 Differentielle Mappings

Da bei der Signalanalyse die Lage innerhalb eines Quadranten, sowie die Quadrantenübergänge korrekt feststellbar sind, besteht die Möglichkeit Informationen in diesen Übergängen unterzubringen. Eine Konstellation verfügt über ebenso viele Übergänge wie Punkte. Die Bandbreitenausnutzung ist somit nicht verringert. Bei einem differentiellen Mapping ist keine Rotationskorrektur nötig.



### 2.8.1 DQPSK

Beim Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) wird die Information mit der Phasenveränderung übertragen. Im Konstellationsdiagramm handelt es sich dabei um Übergängen zwischen den Punkten. Die Symbolwerte werden an Übergangspfeile geschrieben. Der Symbolwert, der durch Beibehalt einer Phase repräsentiert wird, ist durch eine Pfeilschleife gekennzeichnet (Abbildung 6).

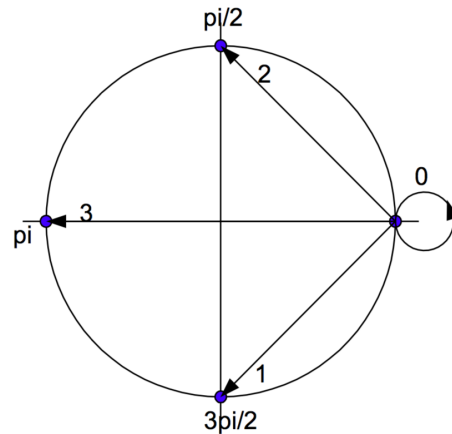


Abbildung 6: Konstellationsdiagramm mit Mapping von DQPSK [14]

### 2.8.2 DQAM

Bei der differentiellen Quadraturamplitudenmodulation (DQAM) ist die Information in Übergängen der Phase und Amplitude enthalten. Die Feststellung der Lage in einem Quadranten erfolgt nach herkömmlichem Prinzip. Dabei ist die Information in der absoluten Position innerhalb eines Quadranten enthalten. Im Fall von 16QAM werden damit die letzten beiden Bits eines Übertragungssymbols repräsentiert. Die ersten beiden Bits werden durch Quadrantenübergänge bestimmt (Abbildung 7).

Mit dem verwendeten Signalanalysator ist eine Demodulation differentieller Mappings möglich. Der Signalgenerator ermöglicht im Arbitrary Mode keine Modulation durch Übergänge, weshalb in dieser Arbeit keine Übertragung durch differentiell modulierte Signale erfolgt.

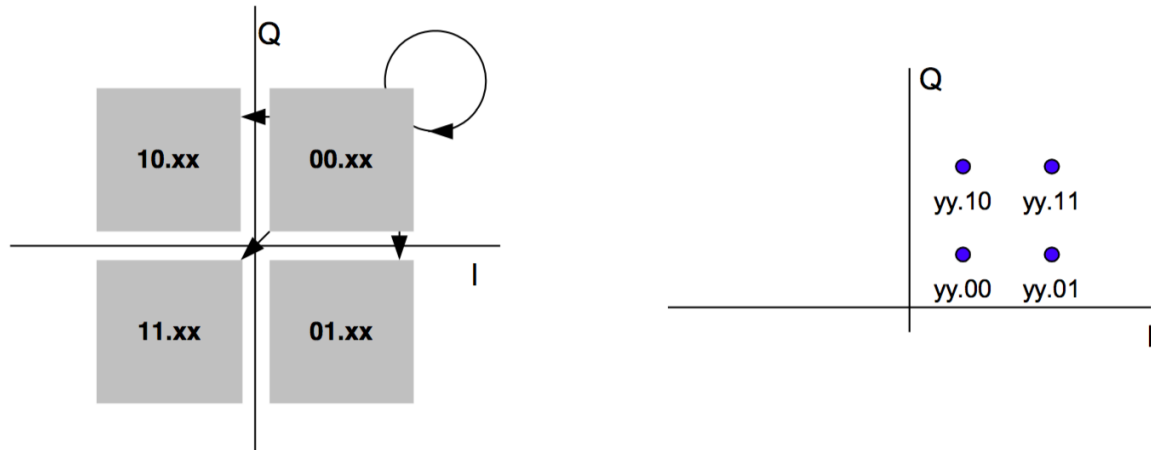


Abbildung 7: Symbolbestimmung im differentiellen Mapping von 16QAM [14]

## 2.9 Versuchsaufbau zur digitalen Drahtlosübertragung

Der Aufbau besteht aus dem Vektorsignalgenerator Rohde&Schwarz SMJ100A. Zeitweise kam der Vektorsignalgenerator Agilent (Keysight) EXG N5172B zum Einsatz. Beim Vektorsignalanalysator (Analyzer) handelt es sich um den Rohde&Schwarz FSQ8. Alle 3 Geräte sind durch Ethernet-Kabel mit einem Netzwerk verbunden. Über das Protokoll TCP/IP lassen sich Sende- und Empfangsdaten zwischen den Geräten und einem PC austauschen (Abbildung 8). Die Fernsteuerung von einem Rechner aus geschieht über SCPI-Befehle (Standard Commands for Programmable Instruments). Dabei handelt es sich um einen speziellen Befehlssatz für Messgeräte.

Zwischen Generator und Analysator kann optional eine Leitung zur Übertragung einer Referenzfrequenz angeschlossen werden. In dieser Arbeit wird die Frequenz vom Generator ausgegeben und vom Analysator mitverwendet. Bei einer getrennten Inbetriebnahme sind kleine Frequenzunterschiede zwischen beiden Geräten festzustellen. Für eine Übertragung ohne Referenzleitung sind zusätzliche Korrekturmaßnahmen nötig, um den Störeinfluss des Frequenzfehlers zu eliminieren. Eine weitere optionale Verbindung stellt die Trigger-Leitung dar. Der Generator überträgt ein Informationspaket in einer kontinuierlichen Wiederholungsschleife. Um auf den Paketanfang korrekt zu synchronisieren, erhält der Analysator vom Generator ein Trigger-Signal (Marker). Für die Verwendung ohne Trigger-Leitung sind auch spezielle Vorkehrungen zu treffen. Auf Details zum Betrieb ohne diese beiden Leitungen wird in späteren Abschnitten noch eingegangen. In dieser Arbeit wird im Software-Kapitel die Anpassung des Programms für diese Fälle beschrieben. Außerdem wurden separate Messungen ohne Referenz- und Trigger-Leitung durchgeführt.

Beide Generatoren geben das modulierte HF-Signal über N-Buchsen aus. Es kommt kein zusätzlicher Antennenverstärker zum Einsatz. Die Generatoren können mittlere

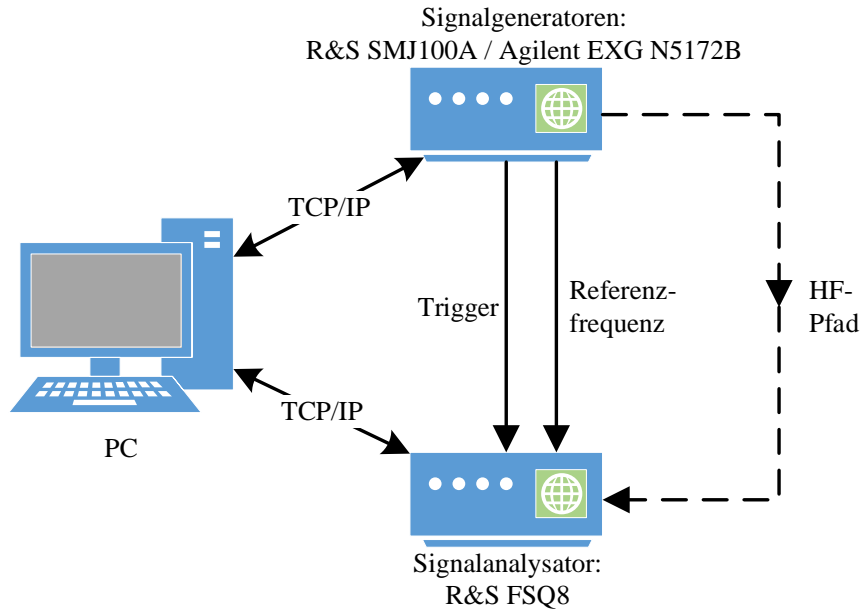


Abbildung 8: Skizze des Versuchsaufbaus

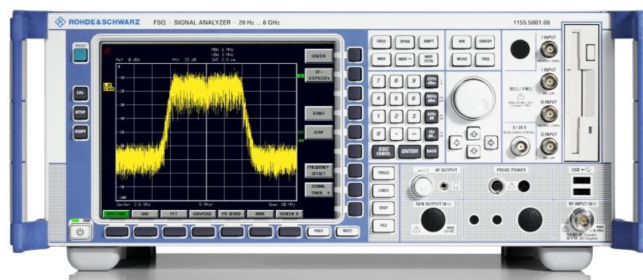
Leistungspegel von  $+15\text{dBm}$  sicher ausgeben. Die Übertragung erfolgt entweder über ein Koaxialkabel oder über Richtantennen. Dabei werden 2 baugleiche Yagi-Antennen verwendet. Den Signalgeneratoren können benutzerdefinierte Sendesymbole vorgegeben werden (Customer Mode). Der vollständige Modulationsprozess findet dabei im Signalgenerator statt. Die Symbolvorgabe kann auch von einem PC aus erfolgen. In dieser Arbeit werden Signalform-Daten als Koordinaten von der Mathematik-Software MATLAB aus an die Generatoren übertragen. Beide Hersteller bieten für MATLAB entsprechende Unterfunktionen an. Bei dieser Konfiguration findet also nur ein Teil der Modulation in den Generatoren statt, der andere Teil erfolgt auf dem Rechner. Der Vorteil dieser teilautomatisierten Modulation ist, dass der Vorgang der Signalformung genau beeinflusst werden kann. Der Signalanalysator nimmt das Empfangssignal ebenfalls über eine N-Buchse auf. Dieses Gerät weist einen hohen Automatisierungsgrad auf. Aus dem modulierten HF-Signal werden direkt die Übertragungssymbole ausgegeben. Der Benutzer kann auf die Signalkonstellation über das Software-Tool mapwiz [23] Einfluss nehmen. Mit dem Generator und Analysator können Daten auf Symbolebene verarbeitet werden. Auf den Generator ist kein direkter Upload beliebiger Dateiformate möglich. Ebenso wenig kann der Analysator verschiedene Dateitypen decodieren und direkt wiedergeben. So können auf dem Gerätedisplay keine Bild- und Textdateien angezeigt werden, die über den HF-Anschluss eingegangen sind. Ein Internetzugriff ist ebenfalls nur über das LAN-Kabel möglich und nicht über eine angeschlossene Antenne an der N-Buchse. Allerdings ermöglicht der Analysator einen Radioempfang mit direkter Ausgabe des Audiosignals.



Rohde&Schwarz SMJ100A [16]



Agilent (Keysight) EXG N5172B [15]



Rohde&Schwarz FSQ8 [14]

Abbildung 9: Verwendete Geräte zur Signalerzeugung und -analyse

Dementsprechend sind Codierung und Decodierung manuell zu programmieren. Die Umsetzung der Dateien auf den Symbolumfang einer Konstellation hat dabei eine besondere Bedeutung. Der Symbolspeicher des Analysators reicht nicht aus, um größere Datenmengen aufzuzeichnen. Die Kapazität variiert und ist von der Modulationsart abhängig. Für die meisten Modulationsarten ist eine Aufzeichnungslänge von 2700 Symbolen dauerhaft erreichbar. Aus diesem Grund muss zur Übertragung größerer Dateien eine Aufteilung des Datenstroms stattfinden. Mit dem Versuchsaufbau findet eine digitale Übertragung von Symbolen oder Dateien statt. Es erfolgt keine Echtzeitübertragung und Wiedergabe, wie beim Rundfunk. Die Übertragung auf dem HF-Weg ist unidirektional.

## 2.10 Erzeugung digitaler HF-Signale mit dem R&S SMJ100A

In dieser Arbeit kommen 2 Signalgeneratoren zum Einsatz: R&S SMJ100A und Agilent EXG N5172B. Der Bereich der Trägerfrequenz beim FSQ8 erstreckt sich von 200 kHz bis 6 GHz. Im Abschnitt Quadraturamplitudenmodulation wurde auf das grundsätzliche Erzeugungsprinzip schon eingegangen. Dabei wurden die Komponenten I und Q eines komplexwertigen Basisbandsignals auf zwei Trägerkomponenten moduliert, die eine Phasendifferenz von  $90^\circ$  zueinander haben. Die Generierung des komplexen Basisbandsignals erfolgt im SMJ100A in 3 Stufen. In der ersten Stufe "IQ-Mapper" findet eine Aufteilung des Datenstroms in zwei Teilströme statt. Die logischen Symbole werden auf komplexwertige Symbole in der IQ-Ebene abgebildet. Die zweite Stufe "Zero Stuffing" fügt zwischen den Symbolen Nullen ein und erzeugt damit ein überabgetastetes Dirac-Signal. Bevor das Signal zur Modulation gelangt durchläuft es noch ein digitales TX-Sendefilter.

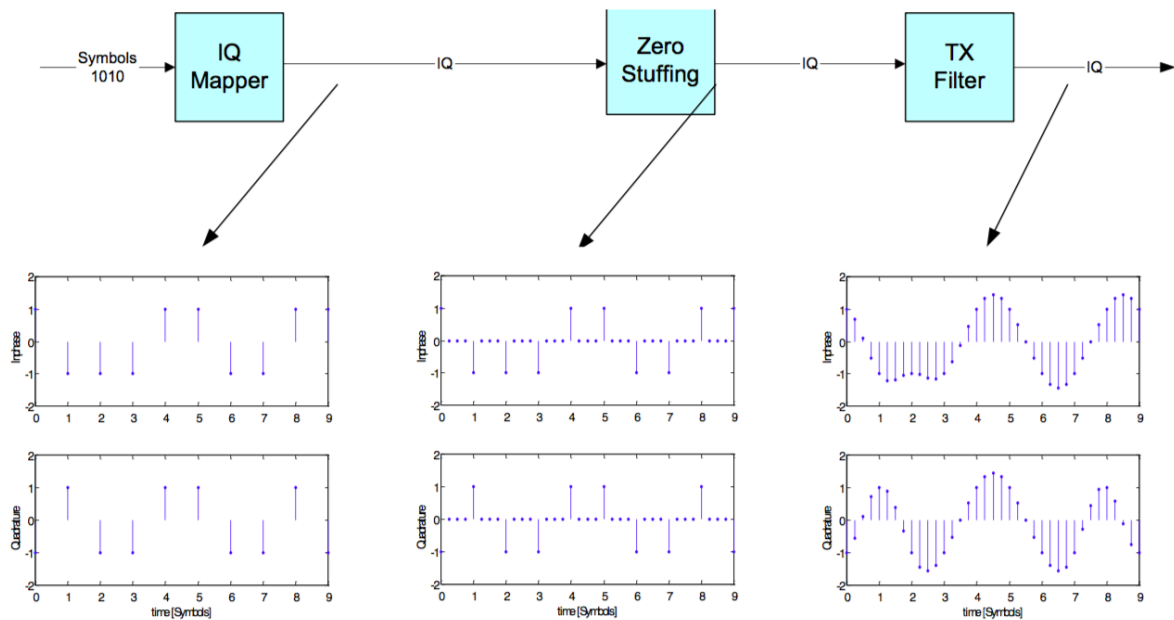


Abbildung 10: Erzeugung eines komplexen Basisbandsignals im R&S SMJ100A [14]

### 3 Funktionsweise des Signalanalysators R&S FSQ8

Der Signalanalysator wird in dieser Arbeit teilweise auch mit der englischen Bezeichnung Analyzer erwähnt. Der Modellname FSQ8 gibt an, dass Trägerfrequenzen bis 8 GHz demoduliert und analysiert werden können. In der vorhandenen Ausführung kann das Gerät als Spektrumanalysator und als Vektorsignalanalysator (VSA) verwendet werden. Nicht verfügbar ist die Funktion eines HF-Oszilloskops mit einer zeitabhängigen Darstellung. Die Vektorsignalanalyse besteht aus 3 Teilen: Die Darstellung des Empfangssignals in einem Konstellationsdiagramm, die Ausgabe von Fehlergrößen und Informationen zur Signalgenauigkeit und die Ermittlung von übertragenen Symbolen bzw. Daten (Abbildung 11). Signaldarstellung und Fehlertabelle unterscheiden den Analysator von einem gewöhnlichen Empfangsgerät (z.B. Mobiltelefon). In diesem Abschnitt soll die Funktionsweise des Analysators grob skizziert werden. Der Analyzer lässt sich in 3 Funktionsabschnitte einteilen (Abbildung 12): Analoger Abschnitt, digitaler Hardware Abschnitt und DSP Abschnitt.

SYMBOL TABLE (Hexadecimal)																								
00000	0	2	3	2	3	1	3	0	2	0	3	0	2	1	1	2	1	1						
00018	1	2	2	3	2	2	3	3	2	3	0	3	3	0	0	3	0	1						
00036	1	0	1	0	1	1	3	3	0	3	0	3	3	1	0	1	1	1						
00054	1	0	2	0	3	3	3	3	0	2	1	1	0	0	0	1	2	2						
00072	3	0	0	0	3	2	3	0	1	0	0	1	3	0	1	3	0	0						
00090	3	1	1	3	1	1	0	1	2	3	1	2	3	0	3	2	0	2						
00108	2	0	1	1	3	1	2	3	1	3	3	1	2	2	0	2	1	0						
00126	2	2	3	1	2	2	0	2	3	0	2	2	3	1	2	0	1	2						
00144	3	0	2	2	1	3	2	0	1	2	3	2	1	3	1	3	2	0						
00162	3	2	1	2	1	3	1	1	3	2	2	2	1	2	3	1	3	3						
00180	3	2	2	0	2	1	0	0	3	3	1	2	2	0	0	1	0	2						
00198	2	3	1	0	3	0	2	3	0	2	0	1	1	2	0	1	2	1						
00216	3	3	2	1	3	2	2	1	0	3	2	1	3	3	2	0	1	3						

Abbildung 11: Angezeigte Symboltabelle im Display des Analysators

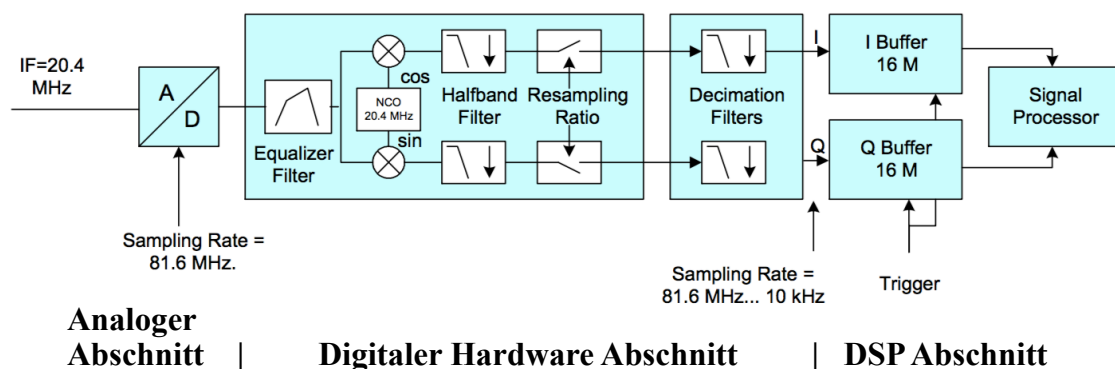


Abbildung 12: Blockschaltbild der Vektorsignalanalyse im R&S FSQ8 [14]

### 3.1 Analoger Abschnitt

In diesem Abschnitt wird das HF-Signal auf eine Zwischenfrequenz (ZF) von 20,4 MHz umgesetzt. Es durchläuft analoge Vorfilter. Diese RBW-Filter (resolution bandwidth) begrenzen das Spektrum für die ZF-Stufen. So werden diese Stufen optimal ausgesteuert und Mischprodukte vermieden. Anschließend durchläuft das Signal einen AD-Wandler mit der Abtastfrequenz 81,6 MHz.

### 3.2 Digitaler Hardware Abschnitt

In diesem Abschnitt werden alle Rechenoperationen und Filterungen digital ausgeführt. Für eine multiplikative Mischung zweier Funktionen, werden die Einzelwerte zweier Folgen sukzessive multipliziert. Bei den digitalen Filtern handelt es sich um Algorithmen in Form von Differenzengleichungen. Am Anfang durchläuft das Signal ein Equalizer-Filter. Dieses kompensiert Amplituden- und Phasenverzerrungen der RBW-Filter. Als nächstes erfolgt die Rückgewinnung des komplexen Basisbandsignals. Im Gerätehandbuch wird dieser Prozess noch nicht als Demodulation bezeichnet. Erst die vollständige Symbolrekonstruktion wird Demodulation genannt. Zum Erhalt der I-Komponente wird das Abtastsignal mit einer Kosinus-Funktion von 20,4 MHz multipliziert. Die Funktion stammt aus einem digital gesteuerten Oszillator (NCO - engl. numerically controlled oscillator). Man erhält die Q-Komponente durch Multiplikation mit dem entsprechenden Sinus-Signal. Im Folgenden soll das mathematische Prinzip für Modulation und Demodulation kurz behandelt werden. Es soll zunächst nur eine Komponente des Basisbandsignals betrachtet werden. Bei der Modulation wird das sinusförmige Basisbandsignal mit der Kreisfrequenz  $\omega_s$  mit einem sinusförmigen Träger der Kreisfrequenz  $\omega_0$  multipliziert. Es resultieren 2 Komponenten bei der Summe und der Differenz der Frequenzen (Abbildung 13). Ihre Amplitude hat sich auf die Hälfte verringert. Die neuen Komponenten finden sich mit selbigem Abstand  $\omega_0$  unterhalb und oberhalb von  $\omega_s$ .

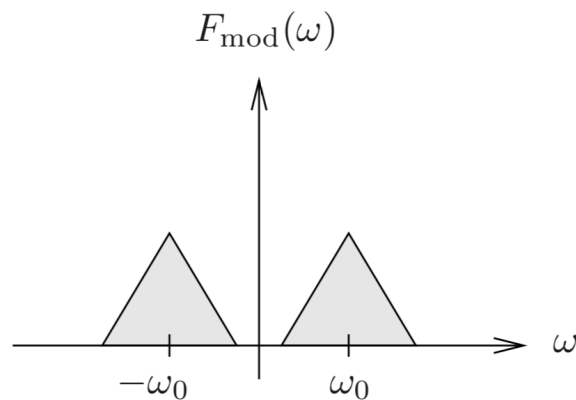


Abbildung 13: Frequenzkomponenten nach der Modulation [20]

Eine weitere Multiplikation mit  $\sin(\omega_0 t)$  führt zur erneuten Ausbildung von jeweils 2 Komponenten (Abbildung 14). Sie liegen bei den Kreisfrequenzen  $-2\omega_0$ , 0 und  $2\omega_0$ . Ihre Amplitude hat sich bei dieser Multiplikation wiederum um die Hälfte verringert. Insgesamt hat sich damit die Amplitude auf ein  $1/4$  verkleinert. Bei der Frequenz 0 liegen 2 Komponenten von  $1/4$  aufeinander und addieren sich so zur Amplitude  $1/2$ . Auf diese Weise wurde aus dem modulierten Signal das Basisbandsignal wiederhergestellt.

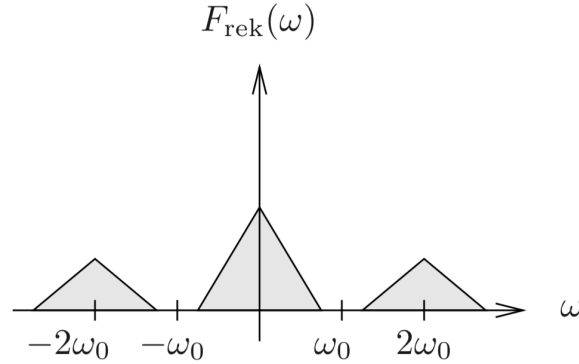


Abbildung 14: Rekonstruiertes Basisbandsignal nach zweiter Multiplikation [20]

Es sollen nun beide Komponenten I und Q betrachtet werden. Für das modulierte Signal  $s(t)$  gilt:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(\omega_0 t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

Nun wird zur Rekonstruktion der I-Komponente  $s(t)$  mit  $\cos(\omega_0 t)$  multipliziert:

$$\begin{aligned} I_{\text{rek}} &= s(t) \cdot \cos(\omega_0 t) = [I(t) \cdot \cos(\omega_0 t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_0 t)] \cdot \cos(\omega_0 t) = \dots \\ &= \frac{1}{2}I(t) + \frac{1}{2} [I(t) \cdot \cos(2\omega_0 t) - Q(t) \cdot \sin(2\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (4)$$

Es ist zu erkennen, dass neben der gewollten rekonstruierten Komponente  $\frac{1}{2}I(t)$  noch weitere Komponenten enthalten sind, die durch Filterung entfernt werden müssen. Analog verläuft die Rekonstruktion von Q. Es folgen die Funktionsschritte Resampling zur Abtastratenerhöhung um einen reellen Faktor und Decimation zur Abtastratenreduktion um einen ganzzahligen Faktor. Die Abtastratenerhöhung arbeitet mit Interpolation. Dabei werden neue geeignete Zwischenwerte hinzugefügt.



### 3.3 DSP Abschnitt

Nach der Stufe Decimation gelangt das Signal zur DSP Abschnitt (digital signal processing). In diesem Bereich findet die Symbolrekonstruktion und Fehlerauswertung statt. Ein komplexwertiger Signalabschnitt wird im Record Buffer gespeichert. Das Signal durchläuft Empfangs- und Messfilter, um intersymbolinterferenzfreie Zustände zu erreichen. Bei der Intersymbolinterferenz (ISI) handelt es sich um eine Störung, bei der zeitlich abfolgende Symbole ineinander fließen. Die Details zur Filtertheorie werden in Kapitel 8 abgehandelt. Die beiden genannten Filter können auch benutzerdefiniert ersetzt werden. Der Demodulationsprozess findet in folgenden Stufen statt:

- Burst Search (optional)
- Demodulator
- Matching
- Error Calc
- Result Display

In der optionalen Stufe Burst Search wird der Record Buffer nach Burst-Strukturen durchsucht. Dabei kann es sich z.B. um Synchronisationsmuster (Pattern) handeln. In der Stufe Demodulator findet die Symbolrekonstruktion statt. Zwei wichtige Funktionen dieser Stufe sind Timing Recovery und Phase & Frequency Recovery. Beim Timing Recovery erfolgt eine Anpassung der Abtastzeitpunkte auf geeignete Symbolentscheidungspunkte im Signal. Beim Phase & Frequency Recovery findet eine Korrektur des Phasen- und Frequenzoffset statt. Dabei werden die ständigen Schwankungen von Phase und Frequenz ausgeglichen. Die Regelung basiert auf der Maximum-Likelihood-Methode. Durch die Korrektur wird die Rotation von Empfangspunkten im Konstellationsdiagramm unterbunden. Aus dem gewonnenen Signal wird anhand des Mappings die Symbole der IQ-Ebene rekonstruiert. Die Funktionseinheit Matching ermittelt aus dem Empfangssignal und dem rekonstruierten Idealsignal die Fehlergröße EVM. Matching passt die Symbolauswertung derart an, dass EVM minimiert wird. Die Stufe Error Calc berechnet aus Empfangs- und Idealsignal weitere Fehlergrößen der Tabelle "Modulation Accuracy". Die Einheit Result Display positioniert und skaliert die Ergebnisausgabe entsprechend der Benutzereinstellungen. Der Signalanalysator verfügt auch über ein adaptives Entzerrfilter und einen adaptiven Equalizer. Sie ermöglichen den Ausgleich linearer Verzerrungen von einem DUT (device under test). In dieser Arbeit wird kein Antennenverstärker verwendet, der solche Verzerrungen erzeugen könnte. Deshalb werden diese beiden Funktionen nicht benötigt.

### 3.4 Modulation Accuracy

Modulation Accuracy lässt sich in etwa als Genauigkeit der Modulation übersetzen. Diese Tabelle enthält Fehlergrößen, die aus der Gegenüberstellung von gemessenem Signal und rekonstruiertem Idealsignal berechnet werden (Abbildung 15). Die Korrektheit der rekonstruierten Referenz kann nicht garantiert werden. Daher besitzen die Werte dieser Fehlertabelle eine begrenzte Aussagekraft. In Messversuchen konnte oftmals eine Diskrepanz zwischen selbst ermittelten Symbolfehlern und dem EVM-Wert festgestellt werden. Wenn statt 0100, 0010 erkannt wird, ist ein Symbolfehler vorhanden, EVM kann trotzdem gering sein. Für die eigene Fehlerberechnung dient eine korrekte Referenz. Die angezeigten Fehler werden zum Teil durch die Funktion Matching korrigiert und sind damit im Konstellationsdiagramm nicht mehr sichtbar. Im folgenden werden die Fehlergrößen der Tabelle Modulation Accuracy erläutert. Die Abbildungen veranschaulichen die Fehlerauswirkungen in der IQ-Ebene, wenn keine Korrektur durchgeführt würde.

MODULATION ACCURACY				
	Result	Peak	atSym	Unit
EVM	6.872	18.457	734	%
Magnitude Err	4.880	18.389	734	%
Phase Error	2.78	-9.60	13	deg
CarrierFreq Err	15.63			Hz
Ampt Droop	0.05			dB
Origin Offset	-44.62			dB
Gain Imbalance	-0.03			dB
Quadrature Err	0.19			deg
RHO	0.995278			
Mean Power	-40.14	-34.13	557	dBm
SNR (MER)	23.26			dB

Abbildung 15: Darstellung der Modulation Accuracy im Display des Analysators

### 3.4.1 EVM

Der Fehlervektor (Error Vector - EV) verläuft vom idealen Konstellationspunkt zum tatsächlich gemessenen Empfangspunkt (Abbildung 16). Der Betrag dieses Fehlervektors wird EVM (Error Vector Magnitude) genannt. Der EVM-Wert wird häufig auf den idealen Signalvektor bezogen angegeben [12].

$$\text{EVM(dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{|P_{\text{meas}}|}{|P_{\text{ideal}}|} \right) \quad (5)$$

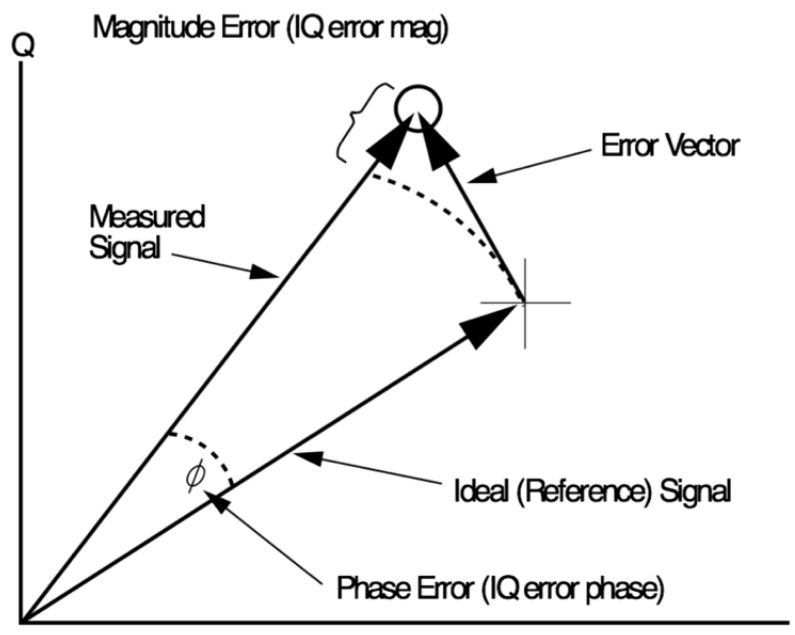


Abbildung 16: Darstellung der Fehlergrößen Error Vector, Magnitude Error und Phase Error im Konstellationsdiagramm [13]

### 3.4.2 Magnitude Error

Wird vom Betrag des idealen Signalvektors der Betrag des gemessenen Signalvektors subtrahiert, so erhält man den Betragsfehler (Magnitude Error, Abbildung 16)

### 3.4.3 Phase Error

Der Phasenfehler (Phase Error) wird ermittelt, indem die Phasendifferenz zwischen dem idealen Signalvektor und dem empfangenen Signalvektor bestimmt wird (Abbildung 16).

### 3.4.4 Carrier Frequency Error

Wie schon beschrieben, findet eine Korrektur des Trägerfrequenzoffset in der Einheit Phase&Frequency Recovery im Demodulator statt. Der ausgeglichene Fehler wird unter Carrier Frequency Error angezeigt.

### 3.4.5 Origin Offset

Wurde bei der Modulation der Träger nicht vollständig unterdrückt, so folgt aus dem Trägerrest ein Offset in der Trajektorie. Dies äußert sich dadurch, dass der Mittelpunkt des empfangenen Signals vom Koordinatenursprung verschoben ist (Origin Offset).

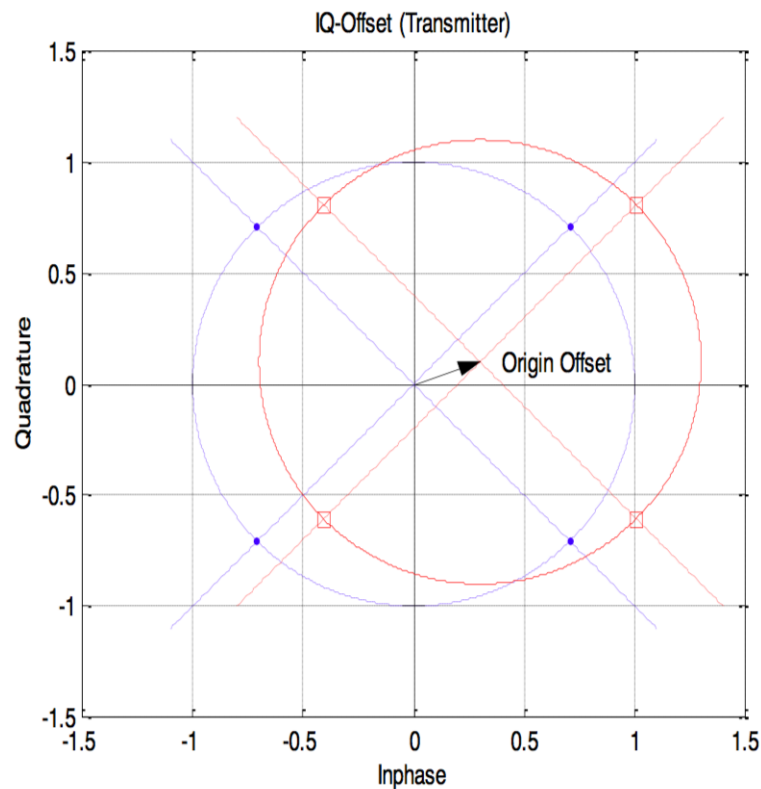


Abbildung 17: Darstellung des Fehlers Origin Offset [14]

### 3.4.6 Gain Imbalance

Dieser Fehler wird auch IQ-Verstärkungsfehler genannt und tritt ein, wenn I- und Q-Komponente nicht exakt um den gleichen Faktor verstärkt werden. Das Koordinatensystem wird verzerrt. Aus einer kreisförmigen Signaltrajektorie wird eine Ellipse.

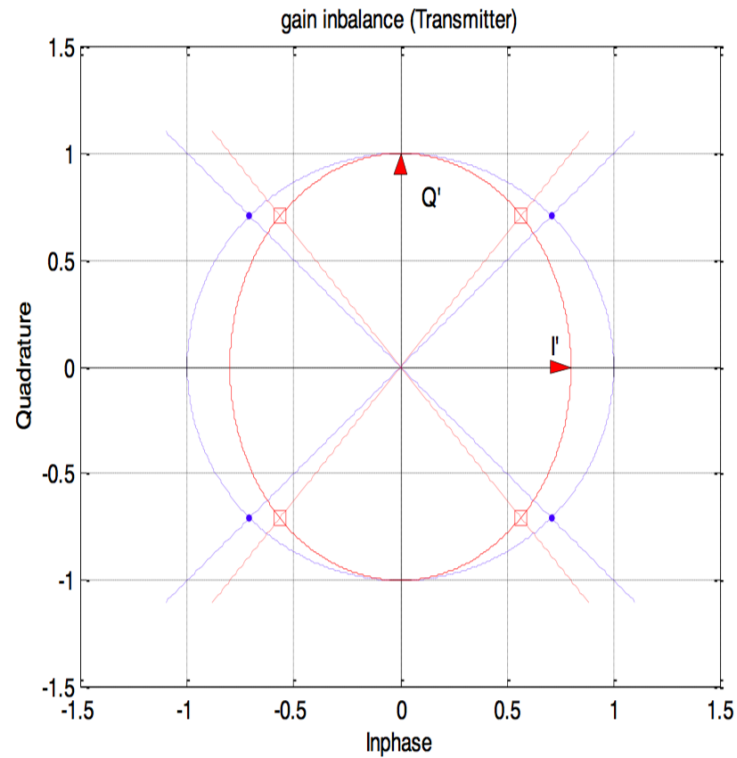


Abbildung 18: Darstellung eines IQ-Verstärkungsfehlers [14]

### 3.4.7 Quadrature Error

Ein weiterer Fehler, der zu einer Verzerrung des Koordinatensystems führt, ist der Quadraturfehler (Quadrature Error). Dabei weicht der Phasenwinkel zwischen I- und Q-Komponente von  $90^\circ$  ab.

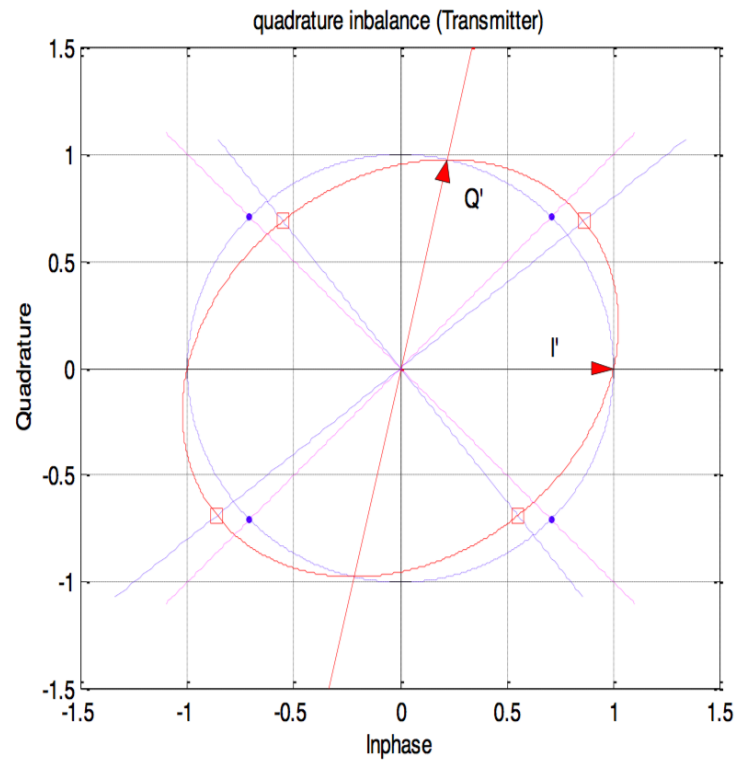


Abbildung 19: Darstellung eines Quadraturfehlers [14]

## 4 Aufbau einer MATLAB-Software zur automatischen Dateiübertragung

In Abbildung 20 ist der Programmablaufplan für eine Dateiübertragung dargestellt. Die zu übertragene Datei wird aus dem Arbeitsverzeichnis importiert. Anschließend findet eine Anpassung des Wertumfangs statt. Dabei handelt es sich um eine Zusammenfassung mehrerer Bits. Beispielsweise können mit 16QAM je Symbol 4 Bits übertragen werden, da  $2^4 = 16$ . Daher werden immer 4 Bits der binären Ausgangsdatei zusammengefasst und in das Hexadezimale umgewandelt. Für den Fall, dass eine Grafik im MATLAB-Bilddatenformat übertragen werden soll, muss eine dimensionale Anpassung stattfinden. Das dreidimensionale Array des Formats ist in einen eindimensionalen Datenvektor umzuwandeln.

Als nächstes erfolgt eine Aufteilung in Übertragungsabschnitte. Der Signalanalysator verfügt nur über eine begrenzte Aufzeichnungslänge von ca. 2700 Symbolen, die für die meisten Dateien nicht ausreicht. Daher ist eine Aufteilung des Datenstroms notwendig. Die Übertragung geschieht abschnittsweise. Danach wird überprüft, ob eine festgelegte Initialfolge im ersten Abschnitt korrekt übertragen wurde. Ist dies nicht zutreffend, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Übertragung des ersten Abschnitts wiederholt. Wurde die Initialfolge korrekt übertragen, erfolgt der Versand der übrigen Abschnitte und der Übertragungsstand wird angezeigt.

Nach dem Empfang aller Abschnitte werden diese zusammengefügt. Es findet eine rückwärtige Anpassung des Wertumfangs statt, z.B. eine Umwandlung vom Hexadezimalen in das Binäre. Falls das MATLAB-Bilddatenformat verwendet wird, erfolgt eine Umwandlung des Empfangsvektors in ein dreidimensionales Array. Die idealen Sendedaten werden in einer Fehlerauswertung mit den empfangenen Symbolen verglichen. Die ermittelten Fehler werden in einer Tabelle angezeigt. Zum Schluss wird die rekonstruierte Empfangsdatei abgespeichert. Wenn eine Grafik im MATLAB-Format übertragen wurde, dann wird diese in einem Fenster angezeigt.

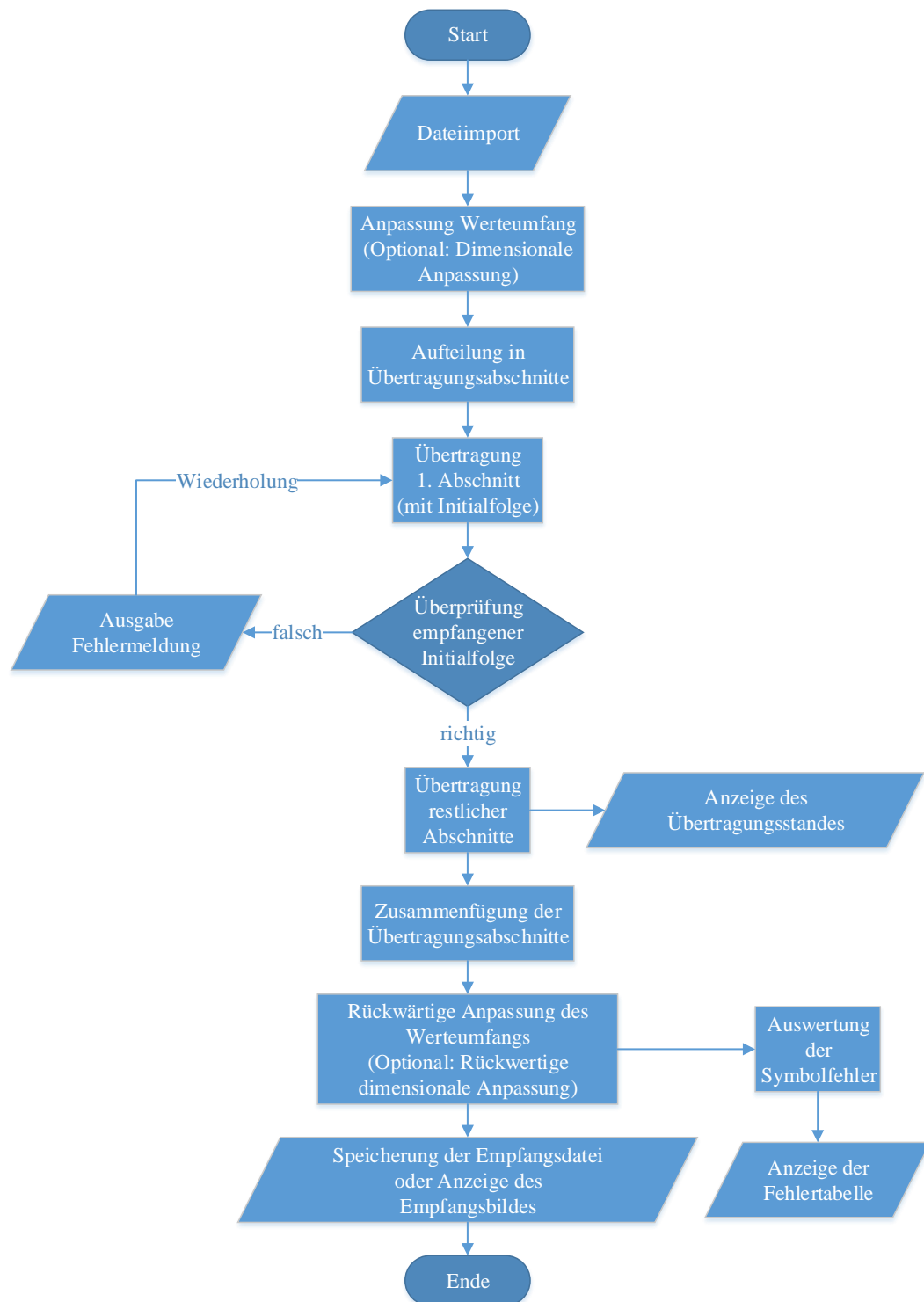


Abbildung 20: Programmablaufplan einer Dateiübertragung



## 4.1 Verwendung des R&S MATLAB Toolkit für Signalgeneratoren und Analyzer

Für die Verwendung des Signalgenerators SMJ100A und des Signalanalysators FSQ8 in Zusammenhang mit MATLAB eignet sich das R&S MATLAB Toolkit. Dabei handelt es sich um eine Sammlung an Unterfunktionen, mit denen die Geräte aus MATLAB heraus mittels SCPI-Befehlen angesprochen werden können. Die notwendigen Unterfunktionen sind dabei unter dem selben Pfad wie die Arbeitsdatei zu speichern um im Skript zum Aufruf zur Verfügung zu stehen. Generell erfolgt die Verbindungsherstellung über `rs_connect`. Die Funktion kennt 3 Verbindungsarten: GPIB, VISA und TCP/IP. Für diese Arbeit wurde TCP/IP ausgewählt. In der Funktion `rs_connect` wird mit der MATLAB eigenen Funktion `tcpip` unter Angabe der IP-Adresse das TCPIP-Objekt `InstrObj` erzeugt [9]. Für die Generierung des Signals wird die Funktion `rs_generate_wave` verwendet. Darin wird `InstrObj` mit den MATLAB-Funktionen `fopen`, `fwrite` und `fprintf` geöffnet und bearbeitet. Zur Übertragung an den Generator werden die Signalform-Daten in `InstrObj` eingeschrieben. Dabei handelt es sich um komplexwertige Daten, die den Koordinaten der Konstellationspunkte entsprechen. Die eigentliche Modulation findet in dieser Ausführung in MATLAB statt. Dies geschieht innerhalb der Funktion `Senden`, auf die später noch eingegangen wird. In `Senden` werden die Symboldaten in Signalform-Daten umgewandelt. Es besteht auch die Möglichkeit, Symboldaten an den Generator zu senden, da dieser über interne Modulationsfunktionen verfügt. Für die Erzeugung benutzerdefinierter Konstellationspunkte ist jedoch die MATLAB-Variante von Vorteil. Zur Signalanalyse wird die Funktion `rs_batch_interpret` benötigt. Darin wird die MATLAB-Funktion `query` aufgerufen. Mit dieser Funktion kann unter Angabe von `InstrObj` und einem SCPI-Kommando eine Anfrage gestartet werden. Darüber wird die Symboltabelle, sowie die Modulationsgenauigkeit aus dem Analyzer-Display abgefragt. Die Übertragung von SCPI-Befehlen erfolgt mit `rs_send_command`. Auch hierbei wird mit den MATLAB eigenen Funktionen `fopen`, `fwrite` und `fprintf` das `InstrObj` beschrieben.

## 4.2 Gliederung der Programmstruktur

Für jede Modulationsart wurde ein separater Programmordner angelegt. Dieser enthält eine Gesamtdatei und Unterfunktionen. Die Arbeitsschritte sind in einzelne Unterfunktionen aufgeteilt und werden von der Gesamtdatei aufgerufen. Daneben enthält jeder Programmordner die Funktionen des R&S Toolkits, die Textdateien `ini.txt`, `scpi.txt` und `scpi1.txt` mit enthaltenen SCPI-Befehlen zum Auslesen des Analyzers sowie Beispielbilder zur Übertragung. Dateien, in deren Namen die Modulationsart angegeben ist, z.B. `Sortierung_16QAM.m` sind speziell nur für diese ausgelegt. Alle übrigen Dateien sind für alle Modulationsarten anwendbar. Da sich der Programmablauf abhängig der Modula-

tionsart nur geringfügig unterscheidet, wird er im Folgenden nur einmal, am Beispiel 16QAM erläutert.

### 4.3 Funktion Gesamtdatei

In diesem Abschnitt wird die Gesamtdatei in einer Kurzbeschreibung abgehandelt. Auf die einzelnen Unterfunktionen wird danach genauer eingegangen. In der Gesamtdatei werden zunächst einige Rücksetzungen auf die Anfangseinstellungen durchgeführt. Der Befehl `clc` löscht den Inhalt des Kommandozeilenfensters, `clear` entfernt vorhandene Variablen aus dem Workspace. Besonders letzterer Befehl hat sich als notwendig herausgestellt. Ohne Löschung der Variablen werden bspw. gleichnamige Vektoren eines vorangegangenen Programmablaufs nicht auf die aktuelle Größe verkürzt und führten zu Störungen. Als nächstes folgt die Rücksetzung des Analyzers, danach werden Voreinstellungen für den Generator und den Analyzer gesetzt. Dies geschieht in der Funktion `Init_Freq_ext_QAM`. Es folgt das Einlesen einer Bilddatei mit Umwandlung in ein MATLAB eigenes Dateiformat mit der MATLAB-Funktion `imread`.

Länge und Breite der Grafik werden mit `size` automatisch ausgelesen. Es wird ein Fenster geöffnet, das das zu übertragende Bild in idealer Qualität anzeigt. Daneben informiert das Fenster über den Übertragungsfortschritt. In der Gesamtdatei wird die Funktion `Bild_einlesen` aufgerufen, die die MATLAB-Bilddaten einliest und in ein für den Sender geeignetes Format umwandelt.

Die nachfolgende Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` unterteilt die Sendedaten in Paketgrößen, die für den Generator und den Analyzer geeignet sind. Anschließend erfolgt die Übertragung paketweise. Die Funktion setzt die Pakete nach dem Empfang wieder zusammen. Die nachfolgende Funktion `Sortierung` führt im Bedarfsfall eine quadrantenweise Umordnung durch. Eine möglichen Vertauschung der Quadranten bei der Übertragung wird dadurch korrigiert. Die sortierten Daten werden vom Sende- und Empfangsformat wieder in das MATLAB-Bilddatenformat mit der Funktion `Bildrekonstruktion` zurückgewandelt. Es folgt eine Fehlerauswertung, bei der die Symbolfehleranzahl und die Symbolfehlerrate ermittelt werden. Anschließend wird das rekonstruierte Bild in einem Fenster angezeigt. Als letztes wird die Funktion `Accuracy_table` in einem weiteren Fenster ausgegeben. Dabei handelt es sich um eine Tabelle, die Angaben zu Übertragungsfehlern enthält.

### 4.4 Funktion Init\_Freq\_ext\_QAM

Diese Funktion führt einen Reset des Analyzers durch und setzt die Voreinstellungen für den Generator und den Analyzer. Die Namensgebung weist darauf hin, dass die Geräte initialisiert werden und eine externe Referenzfrequenz ausgewählt wird. Die Arbeitsfrequenzen von Generator und Analyzer basieren auf geräteinternen Quarzen. Trotz der

hohen Qualitätsstandards für Laborsysteme treten geringfügige Frequenzunterschiede zwischen Generator und Analyzer auf. Deshalb wird in dieser Konfiguration die Centerfrequenz des Generators als Bezug genommen. Der Analyzer verwendet ebendiese Frequenz, die mit einer Referenzleitung übermittelt wird. Der Funktionsname gibt außerdem an, dass diese Initialisierungsfunktion für alle QAM angewendet werden kann. Für QPSK gibt es eine separate Funktion. In Probeläufen hat sich herausgestellt, dass sich die Rücksetzung des Analyzers positiv auf die Übertragungsqualität auswirkt.

An die Funktion werden die Variablen **Centerfrequenz** bzw. **Traegerfrequenz**, **Symbolrate**, **Pegel** und **QAM\_Grösse** übergeben. Um Variablen in SCPI-Befehlen zu integrieren wird die MATLAB-Funktion **sprintf** verwendet. Diese eignet sich zur Einfügung von Variablen in einen String. Die Funktion enthält zwei Argumente: Als erstes den SCPI-Befehl bzw. String. Als zweites die Variable. Mit der Kennzeichnung `%d` wird die Stelle im String angegeben, an der die Variable eingefügt werden soll. Auf diese Weise wird zunächst der SCPI-Befehl für die Einstellung der Centerfrequenz des Analyzers erzeugt. Es folgt die Befehlserzeugung für die Centerfrequenz und den Pegel am Generator. Als nächstes werden die Analyzer-Befehle für die Symbolrate und die QAM-Größe (z.B. 16-QAM) erzeugt. Anschließend wird mit der Funktion **rs\_connect** die Verbindung zum Generator hergestellt. An die Funktion **rs\_send\_command** wird als erstes Argument die Variable **InstrObject** übergeben, die zuvor von der Funktion **rs\_connect** ausgegeben wurde. Als zweites Argument wird ein SCPI-Befehl eingetragen, in diesem Fall als vorbereiteter Befehl, gespeichert in einer String-Variablen. Alternativ kann auch der Befehl direkt eingefügt werden. Für den Generator werden die Center-Frequenz und der Leistungspegel in dBm eingestellt. Die Verbindung zum Analyzer wird hergestellt. Es wird ein Reset des Analyzers durchgeführt. Die Referenzfrequenz wird extern gewählt. Anschließend wird er in den VSA-Modus gesetzt (VSA: Vector Signal Analysis). Es folgt die Einstellung der Trägerfrequenz, Symbolrate, des externen Triggers und der Modulationsart. Des Weiteren wird ein Referenz-Empfangspegel eingestellt. Hierbei erfolgt entweder eine Festwerteinstellung oder eine automatische Pegelerkennung. Es hat sich gezeigt, dass zwischen den Befehlen Pausen von ca. 2 Sekunden notwendig sind, um dem Analyzer genügend Zeit zu geben, die Kommandos umzusetzen.

## 4.5 Funktion **Init\_Freq\_int\_QAM**

Alternativ zur davor beschriebenen Funktion kann auch die Funktion **Init\_Freq\_int\_QAM** verwendet werden. Aus dem Funktionsnamen geht hervor, dass der Analyzer mit einer internen Trägerfrequenz arbeitet. In diesem Fall kann die Leitung für die Referenzfrequenz entfernt werden. Im Wesentlichen ist diese Funktion gleich wie die davor beschriebene aufgebaut, weshalb in diesem Abschnitt nur neu hinzugekommene Kommandos beschrieben werden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass aus dem empfangenen Signal die Center-Frequenz ermittelt und zur anschließenden Signalanalyse beibehalten wird.

Nachdem die Verbindung zum Generator hergestellt wird, erfolgt die Deaktivierung der Modulation. Dies ist nötig um ein reines Sinus-Signal zu erhalten, dass nur bei der Centerfrequenz eine einzige Spektralkomponente aufweist. Ein modulierte Signal würde bei dieser Frequenz keine Komponente enthalten. Stattdessen wären an Frequenzpunkten, die sich durch Addition und Subtraktion von Trägerfrequenz und Basisbandfrequenz ergeben, Komponenten zu finden. Nach der Verbindungsherstellung zum Analyzer wird die Referenzfrequenz auf intern gestellt. Die Mitte des Frequenzdiagramms wird auf die gewünschte Centerfrequenz eingestellt. Die Breite wird auf 100Hz festgelegt, damit auch geringe Frequenzabweichungen präzise erkannt werden können. Das empfangene Signal ist leicht oberhalb oder unterhalb der internen Center-Frequenz zu erwarten. Es erfolgt ein Signal-Tracking. Dabei wird die Frequenz des empfangenen Signals ausgelesen. Beim Übergang in den VSA-Modus wird diese Frequenz als Center-Frequenz übernommen. Nach einer erneuten Verbindungsherstellung zum Generator wird die Modulation wieder aktiviert.

## 4.6 Funktionen `Init_Freq_ext_QPSK` und `Init_Freq_int_QPSK`

Diese Funktionen unterscheiden sich von den davor beschriebenen nur in ihrem Befehl für die Modulationsart. Es wird keine spezielle QAM-Größe als Variable übergeben. Mit dem SCPI-Befehl 'DDEM:FORM: QPSK' wird die Modulationsart QPSK gesetzt. Der Befehl 'DDEM:QPSK:FORM NORM' legt die Mapping-Einstellung "Natural" fest.

## 4.7 Funktion `imread`

Es folgt das Einlesen einer Beispielgrafik mit der MATLAB eigenen Funktion `imread`. Diese Funktion kann Bilddateien aller gängigen Datenformate für Rastergrafiken einlesen. MATLAB legt die Bilddatei unkomprimiert ab. Möglicherweise handelt es sich beim eingelesenen Bild schon um ein komprimiertes Format z.B. JPEG. MATLAB erzeugt ein dreidimensionales Array, dass für jeden Bildpunkt die RGB-Farbinformationen in 24-Bit-Codierung enthält.

## 4.8 Ermittlung der Grafikgröße und Anzeige eines Kontrollfensters zur Bildübertragung

Mit der MATLAB-Funktion `size` wird die Grafikgröße ermittelt. Höhe und Breite des Bildes werden in entsprechende Variablen geschrieben. Als nächstes wird das figure `f` ausgegeben. Der Klammerausdruck enthält Informationen zur Fensterbeschriftung. Mit der Funktion `set` wird die Position und Größe des Fensters festgelegt. Die Funktion `subplot` unterteilt das Fenster in drei Bereiche. Im ersten Bereich wird mit `imshow`

das Bild, wie es auf der Sender-Seite vorliegt in idealer Qualität angezeigt. Es dient als Referenz für einen Vergleich mit dem übertragenen Bild. Im zweiten Bereich wird der Übertragungsstand angezeigt, im dritten Bereich das empfangene Bild. Zweiter und dritter Bereich sind später im Programmablauf implementiert.

## 4.9 Funktion Bild\_einlesen

Diese Funktion wandelt zunächst das dreidimensionale Bilddaten-Array in ein eindimensionales um (Abbildung 21). Nur ein solches Array bzw. ein Vektor kann an den Generator zum Datenversand übergeben werden. Bildhaft darstellen lässt sich dies als Umwandlung eines Würfels in eine Reihe. Umgesetzt wird dieser Schritt mit einer dreifach geschachtelten for-Schleife. Als erstes wird für den Grundton rot die Bildfläche Reihe für Reihe von oben nach unten pixelweise abgearbeitet. Das gleiche Prozedere folgt danach für die Grundtöne grün und blau.

```

26 - i=1;
27 - for l=1:3
28 -     for j=1:Bild_Hoehe
29 -         for k=1:Bild_Breite
30 -             Bildreihe(i)=A(j,k,l);
31 -             i=i+1;
32 -         end
33 -     end
34 - end

```

Abbildung 21: Umwandlung von dreidimensionaler Matrix in Vektor

Die nächsten Schritte unterscheiden sich abhängig der Modulationsart. Drei verschiedene Prinzipien kommen zum Einsatz. Ein Prinzip für 256QAM, eines für 16QAM und ein gemeinsames Prinzip für QPSK, 32-, 64- und 128QAM. Die Umsetzung ist für 256QAM am einfachsten. Da jeder Bildpunkt je Grundton 8-Bit-codiert ist, erfolgt die Darstellung über die Dezimalwerte 0 bis 255. Über exakt diesen Symbolumfang verfügt 256QAM. Der erzeugte Vektor kann ohne weitere Bearbeitung direkt an den Generator übergeben werden. Die Bearbeitung für 16QAM gestaltet sich etwas komplizierter. Der hexadezimale Werteumfang der Bilddaten von 0x0 bis 0xFF (dezimal 0 bis 255) muss auf einen Symbolumfang von 0x0 bis 0xF im Konstellationsdiagramm angepasst werden. Dazu werden mit der Funktion `dec2hex` die Dezimalzahlen in zweistellige Hexadezimalzahlen umgewandelt. Diese werden im nächsten Schritt auf zwei separate Indizes verteilt. Es liegt nun eine einstellige hexadezimale Zahlenfolge vor (Werteumfang: 0x0 bis 0xF). Der Generator erwartet Dezimalzahlen. Hierzu wird mit der Funktion `hex2dec` eine entsprechende Umwandlung durchgeführt (Werteumfang 0 bis 15). Da  $16^2 = 256$  ist, lässt sich dementsprechend ein Farbton eines Bildpunktes mit 2 Symbolen darstellen.

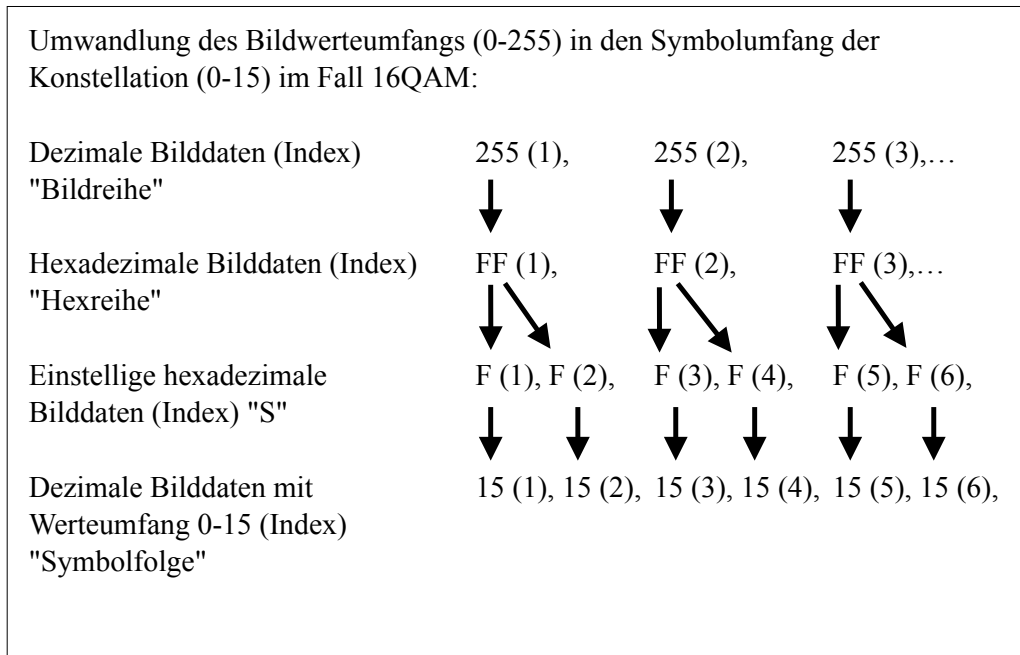


Abbildung 22: Prinzip der Symbolanpassung bei 16QAM

Am aufwändigsten gestalten sich die Umwandlungsprozesse für QPSK, 32-, 64- und 128QAM. Die aufgeführten Konstellationsgrößen lassen sich alle als Zweierpotenzen ausdrücken. Die dezimalen Bilddaten werden zunächst in Binärzahlen umgewandelt. Danach werden mehrere Bits zusammengefasst und wieder in Dezimalzahlen umgewandelt, deren Werteumfang der Konstellationsgröße entspricht. Am Beispiel von 32QAM soll der Prozess verdeutlicht werden: Nach der Umwandlung des dreidimensionalen **Bilddaten-Array** in eine Reihe werden die Dezimalzahlen in 8 Bit lange Binärzahlen konvertiert. An die MATLAB-Funktion `dec2bin` wird die Stellenanzahl 8 übergeben. Anderweitig wäre die Stellenanzahl dynamisch. Eine Rückwandlung nach dem Empfang wäre damit nicht mehr möglich. Die Matrix `Datenstrom_bin8` enthält eine Binärfolge mit 8-Bit-Aufteilung. Es wird daraus der Vektor `Datenstrom_bin` erzeugt, der eine Bitfolge ohne Aufteilung enthält. Da  $2^5 = 32$ , sollen Vorbereitungen für eine 5-Bit-Aufteilung der Binärfolge getroffen werden. Möglich ist, dass die Länge des Datenstrom-Vektors sich nicht durch 5 dividieren lässt. Für diesen Fall muss der Vektor um so viele Nullen verlängert werden, dass er ein Vielfaches von 5 darstellt. Die benötigte Anzahl an 5-Bit-Abschnitten  $L$  wird berechnet, in dem die aktuelle Datenstrom-Länge durch 5 dividiert und mit der Funktion `ceil` aufgerundet wird.  $L$  wird mit 5 multipliziert, es resultiert die Länge des verlängerten Datenstrom-Vektors `Laenge_Datenstrom_ext` (ext von engl.

extended - verlängert). Mit dieser Länge wird ein Nullvektor `Datenstrom_bin_ext` angelegt. Auf diesen werden die Daten aus dem unverlängerte Datenstrom-Vektor überschrieben. Als nächstes findet eine 5-Bit-Aufteilung der Binärfolge statt, abgelegt in der Matrix `Datenstrom_bin5`. Jeder 5-Bit-Abschnitt wird nun in eine Dezimalzahl umgewandelt und in dem Vektor `Umverteiltetes_Signal` gespeichert. Diese Dezimalzahlen weisen Werte zwischen 0 und 31 auf. Zum Schluss wird ein neuer Vektor `Symbolfolge_mit_Initialfolge` angelegt. Dieser wird am Anfang mit der Initialfolge 0 bis 31 beschrieben. Danach werden die Nutzdaten angereiht. Dieser Vektor wird von der Funktion an die Gesamtdatei zurückgegeben. Bei QPSK findet eine Aufteilung in 2-Bit-Abschnitte statt. Bei 64QAM sind die Abschnitte 6 Bit lang bei 128QAM 7 Bit.

Umwandlung des Bildwerteumfangs (0-255) in den Symbolumfang der Konstellation (0-31) im Fall 32QAM:

Dezimale Bilddaten in "Datenstrom\_dec" (Index):

255 (1),      255 (2),      255 (3),...

Binäre Bilddaten in 8-Bit-Aufteilung in der Matrix "Datenstrom\_bin8":

11111111  
11111111  
11111111

Binäre Folge ohne Aufteilung in "Datenstrom\_bin" (Anzahl Ziffern).  
Der Datenstrom soll durch 5 teilbar sein und muss ggf. verlängert werden:

1111111111111111111111111111 (24)  
1111111111111111111111111111x

Anreihen von Nullen um ein Vielfaches von 5 zu erhalten:

11111111111111111111111111110 (25)

Erzeugung einer Bitfolge mit 5-Bit-Aufteilung und Speicherung in der Matrix „Datenstrom\_bin5“. Umwandlung in das Dezimalsystem und Speicherung in „Umverteiltes\_Signal“:

Datenstrom_bin5:	Umverteiltes_Signal:
11111	31
11111	31
11111	31
11111	31
11110	30

Sendefolge(Index): 31 (1), 31 (2), 31 (3), 31 (4), 30 (5),

Abbildung 23: Prinzip der Symbolanpassung bei 32QAM



## 4.10 Funktion Aufteilen\_Senden\_Empfangen

Am Signal Analyzer FSQ8 lassen sich Aufzeichnungslängen bis zu 8120 Symbolen einstellen. Die Aufzeichnungslängen, die sich mit MATLAB abfragen lassen, sind jedoch deutlich kürzer. Die eingestellte Modulationsart hat dabei Einfluss auf die übertragbare Länge. Je größer die Anzahl an Konstellationspunkten, desto weniger Symbole lassen sich aufzeichnen. Allerdings verringert sich durch den größeren Wertebereich auch die Anzahl an benötigten Symbolen, um eine Datei zu übertragen. Die maximale Aufzeichnungslänge variiert zudem von Abfrage zu Abfrage. Bei QPSK lassen sich dauerhaft 3500 aufgezeichnete Symbole übertragen, bei 16QAM 2700 Symbole und bei 256QAM 2000 Symbole.

$$\text{Length} \cdot \text{Width} \cdot \text{Colours} \cdot \text{SymPerColour} = 21 \cdot 21 \cdot 3 \cdot 2 = 2646 \quad (6)$$

Wie aus Gleichung 6 ersichtlich wird, lässt sich bei 16QAM mit einer Aufzeichnung eine maximale Bildgröße von 21x21 des MATLAB-Bilddateityps übertragen. Für die Übertragung größerer Grafiken bzw. Dateien ist eine Unterteilung der Datenmenge notwendig. Zunächst wurde in Betracht gezogen, die gesamte Bildfläche in kleinere Teilflächen zu untergliedern. Für eine universelle Verwendung unabhängig des Dateityps ist eine Unterteilung des eindimensionalen Datenvektors von Vorteil.

An die Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` werden die Variablen `Bilddaten`, `Symbolrate` und `Aufzeichnungslaenge` übergeben. `Aufzeichnungslaenge` wird als `Abschnittlaenge` weiterverwendet. Die Symbolrate wird wiederum an die Unterfunktion `Senden` übergeben.

$$\frac{\text{Length} \cdot \text{Width} \cdot \text{Colours} \cdot \text{SymPerColour}}{2700} = \frac{128 \cdot 128 \cdot 3 \cdot 2}{2700} = \frac{98304}{2700} = 236,41 \quad (7)$$

In Gleichung 7 ist zu erkennen, dass sich bei einer Bildgröße von 128x128 und der Modulationsart 16QAM, der Datenvektor nicht exakt in Abschnitte von 2700 Symbolen aufteilen lässt. In den meisten Fällen ist dies nicht möglich. Deshalb muss der Datenvektor um so viele Nullen verlängert werden, dass er ein Vielfaches der Abschnittslänge darstellt. Um die Anzahl der Abschnitte zu berechnen, wird die Länge des Bilddaten-Vektors durch die Abschnittlänge geteilt und das Ergebnis mit der Funktion `ceil` aufgerundet. Die Anzahl der Abschnitte wird im Code `Zeilenanzahl_Matrix` genannt, da die Abschnitte später als Vektoren in einer Matrix zusammengefasst werden. Um die Symbolanzahl des Datenvektors zu bestimmen, der durch Nullen verlängert wurde, wird die Abschnittlänge mit der Abschnittanzahl (bzw. `Zeilenanzahl_Matrix`) multipliziert. Das Ergebnis

wird in der Variable `Verlaengerte_Reihe` gespeichert. In dieser Länge wird der Nullvektor `Bilddaten_verlaengert` angelegt. Dieser wird mit den Bilddaten gefüllt. Der verlängerte Vektor liegt nun vor. Er wird mit einer zweifach geschachtelten for-Schleife in Abschnitte unterteilt, die vektorenweise in der `Bilddaten_matrix` angelegt werden.

In den nachfolgenden Programmteilen werden die Abschnitte nacheinander an den Generator übergeben, von ihm versendet, vom Analyzer empfangen und anschließend zu der `Empfangssignal_matrix` wieder zusammengesetzt. Der erste Abschnitt wird vorweg übermittelt, um die korrekte Übertragung der Initialfolge zu überprüfen, die sich am Anfang des ersten Abschnittes befindet. Danach erfolgt die Übertragung der übrigen Abschnitte. Die erste Zeile der `Bilddaten_Matrix` wird in den Vektor `Signalteil` überschrieben. Dieser Vektor wird vom Generator versendet. Dies geschieht mit der Unterfunktion `Senden_SMJ100A`, auf die später noch genauer eingegangen wird. Der Empfang erfolgt mit der Funktion `Empfang_FSQ8_veraendert`, die ebenfalls später erläutert wird. Nach dem Empfang wird die Funktion `Mod_Accuracy`, deren Inhalt später beschrieben wird, aufgerufen. `Mod_Accuracy` überträgt einige Werte der gleichnamigen Tabelle von der Analyzer-Anzeige. Hierin aufgeführt sind verschiedene Fehler-Kenngrößen der Modulation. Die Werte werden für jeden Übertragungsblock abgerufen, aufaddiert und am Ende durch die Block-Anzahl dividiert um Mittelwerte für die vollständige Übertragung zu erhalten. Die Fehlerwerte des ersten Blocks werden in `Accuracy_sum` geschrieben. Die ersten 16 Symbole des empfangenen Vektors `E` werden in den Vektor `Initialfolge` überschrieben. Für die Initialfolge gilt, dass eine Zahlenreihe von 0 bis 15 in 4 Blöcke unterteilt wird. Diese Blöcke dürfen untereinander vertauscht sein. Die Ziffernfolge innerhalb eines Blockes darf nicht verändert sein. In diesem Programmteil wird lediglich geprüft, dass keine Zahl mehrfach in der Initialfolge vorhanden ist. Dazu wird die Funktion `find` verwendet, die zu gegebenen Werten zugehörige Indizes ausgibt. In einer for-Schleife werden mit dieser Funktion alle Werte von 0 bis 15 einzeln überprüft. Enthält der Lösungsvektor `A` mehr als einen Index, wird die Fehlermeldung "Fehler: Die Initialfolge wurde nicht korrekt uebertragen!" ausgegeben. Mit dem Befehl `return` wird das Programm abgebrochen. An dieser Stelle kommen unterschiedliche Programmvarianten zum Einsatz, abhängig davon, welche Modulationsart und welche Art von Initialfolge verwendet werden. Anschließend wird der erste übertragene Abschnitt in der `Empfangssignal_matrix` abgelegt. Die folgende Schleifenkonstruktion besteht aus einer äußeren for-Schleife, die von der zweiten bis zur letzten Zeile die `Bilddaten_matrix` abarbeitet. Außerdem existieren zwei innere for-Schleifen, eine vor dem Versand und eine nach dem Empfang. Die erste for-Schleife überschreibt die aktuellen Zeile `i` der Matrix in den Vektor `Signalteil`, der versendet wird. Der empfangene Vektor `E` wird mit der zweiten for-Schleife in die Zeile `i` der `Empfangssignal_matrix` eingeordnet. Zu den bisher aufaddierten Fehler-Größen unter `Accuracy_sum` werden die Fehler des aktuellen Übertragungsblocks addiert, woraus die neue Summe resultiert. In diesem Programm-

abschnitt erfolgt auch die Ausgabe des Übertragungsstandes. Dabei wird angegeben, wieviel Übertragungspakete insgesamt zu versenden sind und wieviel schon versendet wurden, z. B. 17 von 37. Der Übertragungsstand wird in der Mitte des subplots zwischen gesendetem und empfangenen Bild angezeigt. Da Text an den subplot als String zu übergeben ist, werden die Integer-Variablen entsprechend konvertiert. So wird die aktuelle Zeilennummer *i* und die *Zeilenanzahl\_matrix* als *si* und *zi* übergeben. Da die Textfunktion des subplot bei neuem Text den vorhandenen überlagert, muss nach jedem Durchlauf der alte Text *h* gelöscht werden, bevor ein neuer ausgegeben wird.

```

83 - for i=2:Zeilenanzahl_Matrix
84 -     for j=1:Abschnittlaenge
85 -         Signalteil(j)=Bilddaten_matrix(i,j);
86 -     end
87 -     si=int2str(i);
88 -     zi=int2str(Zeilenanzahl_Matrix);
89 -     h=subplot(1,3,2);
90 -     text(0.5,0.5,si);           %Ausgabe des Uebertragungsstandes
91 -     text(0.6,0.5,'von');
92 -     text(0.7,0.5,zi);
93 -     B=Senden_SMJ100A_16QAM(Signalteil,Symbolrate);
94 -     %-----
95 -     E=Empfang_FSQ8_veraendert;
96 -     Accuracy_sum=Mod_Accuracy+Accuracy_sum;
97 -     pause(0.001);|
98 -     delete(h);
99 -     for j=1:Abschnittlaenge
100 -         Empfangssignal_matrix(i,j)=E(j);
101 -     end
102 - end

```

Abbildung 24: Die Übertragungsschleife versendet die Bilddaten vom zweiten bis zum letzten Abschnitt und setzt sie wieder zusammen

Mit der nächsten for-Schleife werden die Zeilen der *Empfangssignal\_matrix* zusammenhängend in den Vektor *Empfangssignal\_verlaengert* überschrieben. Dieser weist die gleiche Länge wie der Vektor *Bilddaten\_verlaengert* auf der Sendeseite auf. Er besteht ebenso aus den Nutzdaten und den Nullen, die am Ende angefügt wurden, um ein ganzzahliges Vielfaches der Abschnittlänge zu erreichen. Dieser Vektor wird um die angereihten Nullen verkürzt. Als Orientierung dient die Bilddaten-Länge von der Eingangsseite. Der Rückgabevektor *Empfangssignal* enthält die Initialfolge und die Nutzdaten in ungeordneter Reihenfolge, insofern bei der Übertragung ein Quadrantentausch eingetreten ist. Außerdem zurückgegeben wird der Vektor *Accuracy*. Er wird mittels Division von *Accuracy\_Sum* durch *Zeilenanzahl\_Matrix* berechnet.

### Ablaufprinzip der Funktion "Aufteilen\_Senden\_Empfangen"

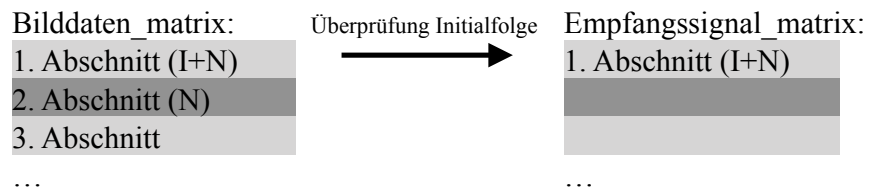
Aufteilung der Sendefolge (Initialfolge+Nutzdaten) in Abschnitte zu 2700 Symbolen in diesem Beispiel.

Auffüllung des letzten Abschnitts mit Nullen:

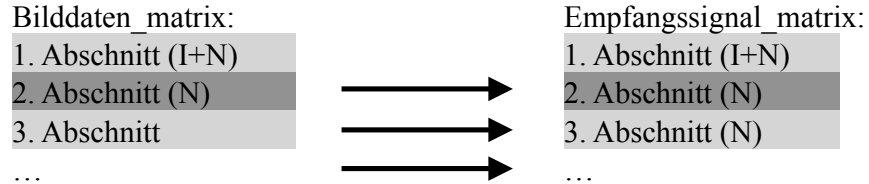
1. Abschnitt	2. Abschnitt	Letzter Abschnitt
Initialfolge+Nutzdaten	Nutzdaten	...Nutzdaten+Nullen
2700 Symbole	2700 Symbole	... 2700 Symbole

Umwandlung in "Bilddaten\_matrix". Je Abschnitt eine Zeile.

Übertragung des 1. Abschnitts. Prüfung der empfangenen Initialfolge:



Übertragung der übrigen Abschnitte:



Umwandlung von „Empfangssignal\_matrix“ in Vektor:

1. Abschnitt	2. Abschnitt	Letzter Abschnitt
Initialfolge+Nutzdaten	Nutzdaten	...Nutzdaten+Nullen
2700 Symbole	2700 Symbole	... 2700 Symbole

Entfernung der angefügten Nullen. Rückgabe an Gesamtdatei.

Der Vektor ist noch nicht sortiert und enthält noch die Initialfolge.

Abbildung 25: Darstellung des Funktionsablaufs von "Aufteilen\_Senden\_Empfangen"

Durch die Verlängerung des letzten Sendeabschnitts kann es im Extremfall dazu kommen, dass sich darin nur ein Symbol und 2699 Nullen befinden. Als Alternative könnte eine Fallunterscheidung implementiert werden. Dazu würde über eine if-Abfrage bei jedem Schleifendurchlauf geprüft werden, ob der Abschnitt weniger als 2700 Symbole lang ist. Für den letzten Abschnitt wäre dann an den Analyzer ein Befehl für eine andere Aufzeichnungslänge zu senden.

## 4.11 Funktion Senden

Die Funktion `Senden` stammt von [11] und wurde für diese Arbeit angepasst. In der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` wurden die Funktionen `Senden` und `Empfang_FSQ8` aufgerufen, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird. Die Funktion `Senden` ist für jede Modulationsart speziell ausgeführt. Dazu wird immer die QAM-Größe angegeben, wobei QPSK als 4QAM deklariert wird. Ein weiteres Merkmal, worin sich die verschiedenen `Senden`-Funktionen unterscheiden ist das sog. Mapping. Dabei handelt es sich um die Zuordnung von Symbolen zu Punkten im Konstellationsdiagramm. Mit der MATLAB-Funktion `modem.qammod` wird die Konfiguration für die Quadraturamplitudenmodulation `hMod` erzeugt. An diese Funktion werden 3 Größen übergeben. Bei `QAM_type` übergeben durch `M` handelt es sich um die QAM-Größe, `Symbolorder` übergeben durch `Symbol_mode` ist ein Einstellungsmodus für das Mapping. Der Vektor `Symbolreihenfolge` enthält die Information für das Symbolmapping. Bei `Symbol_mode` kann `Binary`, `Gray` oder `User-defined` angegeben werden. In der Einstellung `Binary` sind die Symbole von 0 bis 15 spaltenweise von oben nach unten aufsteigend angeordnet (Abbildung 26).

Bei der Einstellung `Gray` (Abbildung 27) handelt es sich um eine Anordnung, bei der sich benachbarte Symbole in ihrer binären Darstellung nur in einem Bit unterscheiden [10]. In der Einstellung `User-defined` erfolgt das Mapping nach der Festlegung im Vektor `Symbolreihenfolge`. Da keine Matrix verwendet wird, um das Punkte-Feld zu beschreiben, muss eine spezielle Zuordnung der Punkte zu den Indizes des Definitionsvektors beachtet werden. Die Vektor-Indizes sind im Konstellationsdiagramm nach dem Mapping `Binary` geordnet. Wird beispielsweise der Vektor mit einer aufsteigenden Symbolfolge von 0 bis 15 beschrieben, so erscheinen die Symbole im Diagramm nach dem `Binary`-Mapping. Der Analyzer FSQ8 ist für alle QAMs auf das Mapping DVB-C voreingestellt (Abbildung 28). Die genauen Zuordnungen der Symbole zu den Punkten des Konstellationsdiagramms sind im Handbuch des FSQ8 enthalten. In dieser Arbeit wurden alle Mappings manuell mit dem Vektor `Symbolreihenfolge` erstellt. Zur Erzeugung des Mappings DVB-C in 16QAM sind die Werte in den Reihenfolge-Vektor wie in Abbildung 29 dargestellt, einzutragen.

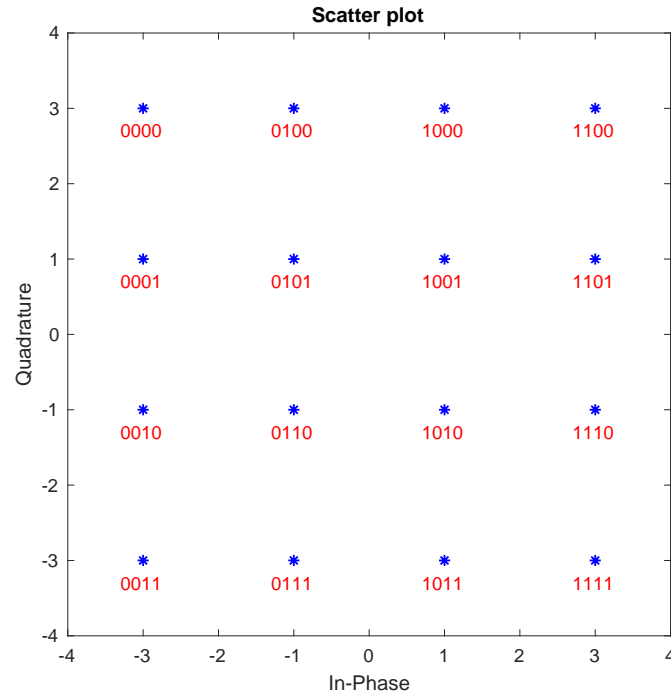


Abbildung 26: Matlab-Darstellung eines 16QAM-Binary-Mappings

Mit der Funktion `modulate` werden die Sendedaten `IN_data` unter Berücksichtigung der Konfiguration `hmod` moduliert. Der Vektor `QAM_data` enthält eine Folge aus komplexen Zahlen, die die Koordinaten der Punkte im Konstellationsdiagramm angeben. Diese werden in Real- und Imaginärteil zerlegt und in die Vektoren `I_data` und `Q_data` geschrieben. `I_data` und `Q_data` werden neben weiteren Informationen an das Struktur-Array `IQInfo` übergeben. `IQInfo` wird wiederum an die Funktion `rs_generate_wave` zum Versand übergeben.

Die Funktion `Senden` verfügt über Möglichkeiten zur Daten-Visualisierung im Konstellationsdiagramm in MATLAB. Dabei handelt es sich um die Daten vor dem Versand. Wird die Funktion `Senden` innerhalb der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` aufgerufen, ist die Visualisierung zu deaktivieren (Auskommentieren mit `%`). Ansonsten wird bei jedem Schleifen-Durchlauf ein Fenster geöffnet. Die Daten können nur unter Hinzufügung eines Rauschens sichtbar gemacht werden, was durch die Funktion `awgn` erfolgt. Der Rauschabstand wird über `SNR` eingestellt (`SNR`: Signal to Noise Ratio). Mit der Funktion `ScatterPlot` wird ein leeres Konstellationsdiagramm erzeugt. Das verrauschte Signal `ynois` wird mit der Funktion `update` zum Diagramm hinzugefügt.

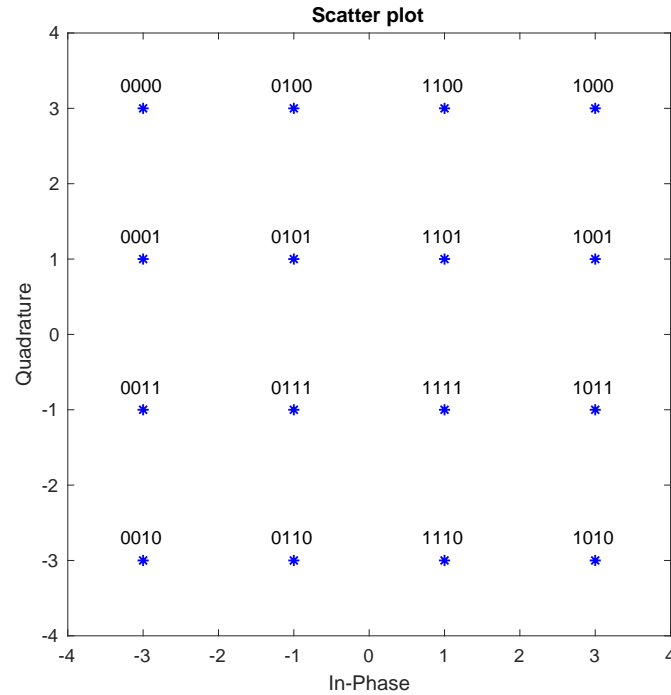


Abbildung 27: Matlab-Darstellung des Mappings Gray-Code

## 4.12 Funktion Empfang\_FSQ8

Wie die Funktion `Senden`, entstammt die Funktion `Empfang_FSQ8` ebenfalls von [11] und wurde für diese Arbeit angepasst. Zunächst wird durch den Funktionsaufruf von `rs_connect` die TCP/IP-Verbindung zum Analyzer hergestellt. Als nächstes wird eine Initialisierung mithilfe der Funktion `rs_batch_interpret` durchgeführt. Dazu wird die Textdatei `ini.txt` an die Funktion übergeben. Hierin enthalten sind SCPI-Befehle zum Auslesen von Systemfehlern. Anschließend werden mit `rs_batch_interpret` die Empfangsdaten abgerufen. In diesem Fall wird die Textdatei `SCPI.txt` übergeben. Darin enthalten ist der SCPI-Befehl `'TRACE2? TRACE1'`. Mit den TRACE-Befehlen lassen sich unterschiedliche Anzeige-Elemente des Analyzer-Displays übertragen. Mit `TRACE1` wird der Inhalt der Symbol Table abgefragt. Der gewonnene String `result.text` wird mit `str2num` in ein Zahlen-Array umgewandelt. Die Funktion gibt den Ergebnisvektor `out` zurück.

## 4.13 Funktion Mod\_Accuracy

`Mod_Accuracy` wird in der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` mehrmals aufgerufen. Sie dient dazu, einige Werte der Tabelle Modulation Accuracy aus der Analyzer-Anzeige abzurufen. Zunächst wird mit `rs_connect` die Verbindung zum Analyzer hergestellt. Zur Initialisierung wird mit `rs_batch_interpret` die Datei `ini.txt` übertragen.

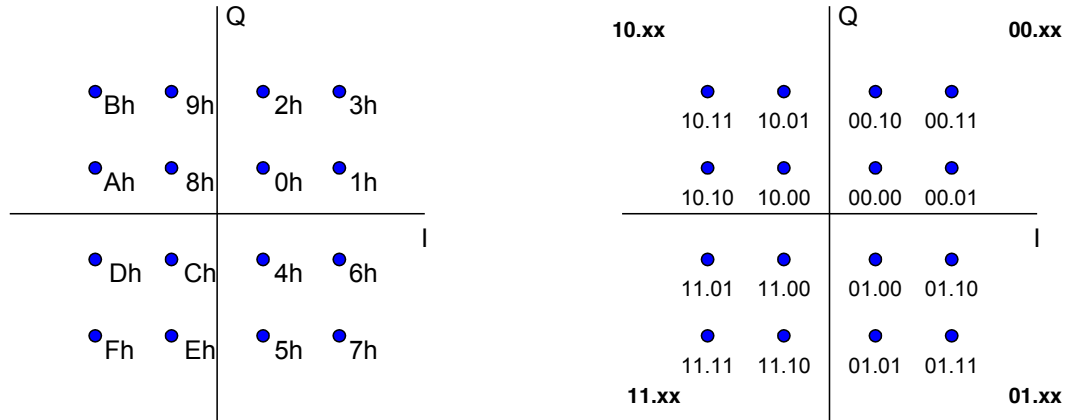


Abbildung 28: Voreingestelltes Analyzer-Mapping DVB-C [14]. Links: Hexadezimale Darstellung. Rechts: Binäre Darstellung. Die Quadranten bestimmen die ersten beiden Bits der binären Symbole.

```
32 - | Symbolreihenfolge=[11 10 13 15 9 8 12 14 2 0 4 5 3 1 6 7];
33 - | Symbol_mode = 'User-defined';
```

Abbildung 29: Reihenfolge-Vektor für ein DVB-C-Mapping in 16QAM im MATLAB-Skript

Die Erfragung des Tabelleninhalts von Modulation Accuracy erfolgt mit der Funktion `rs_batch_interpret` und der Datei `scpi1.txt`. In dieser enthalten ist der SCPI-Query 'TRACE2? TRACE2'. Mit TRACE2 wird der Inhalt der Tabelle Modulation Accuracy abgefragt. 53 Messwerte sind im String `result.text` enthalten. Als erstes wird von Index 1 der Mittelwert der EVM (Error Vector Magnitude) abgerufen. Als nächstes erfolgt der Abruf des mittleren Betragsfehlers, engl. Magnitude Error, im Display abgekürzt `MagnitudeErr`. Er ist im Ergebnis-Vektor auf Index 9 platziert. Von Index 16 wird der Phasenfehler abgerufen, engl. Phase Error, im Display `PhaseErr`. Zuletzt erfolgt von Index 39 der Abruf der gemittelten Leistung des Empfangssignals. Dieser Wert ist vor allem bei einer drahtlosen Übertragung bedeutend, da er Auskunft über die Dämpfung gibt. Die in der Tabelle ermittelten Werte beziehen sich auf einen Übertragungsabschnitt. Eine Länge von 2700 Symbolen wird hierbei häufig verwendet. Über diese Länge werden die Fehlerwerte automatisch durch den Analyzer berechnet und gemittelt. Der Analyzer gibt zudem in der Tabelle auch die Spitzenwerte für einen Abschnitt aus. Mit der Funktion `Mod_Accuracy` werden die Mittelwerte eines Abschnittes aufgerufen, woraus dann in der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` die Mittelwerte aller Abschnitte, d.h. die Mittelwerte der ganzen Übertragung errechnet werden.



## 4.14 Funktion Sortierung\_vollst

Der Analyzer erkennt keine absolute Position im Konstellationsdiagramm, sondern nur eine relative Veränderung der Position zu einer davor gemessenen. Ihm ist nicht bekannt, in welchem Quadranten des Konstellationsdiagramms sich das erste Symbol befindet. Er kann jedoch die Symbole innerhalb eines Quadranten richtig ausmachen, sowie relative Quadrantenübergänge korrekt erkennen. So ist feststellbar, ob ein nachfolgender Quadrant gegenüberliegt, oder sich durch eine Rotation um  $\pi/2$  bzw.  $-\pi/2$  erreichen lässt. Der Anfangsquadrant wird zufällig ausgewählt. Somit sind 4 Varianten der Symbolerkennung möglich, wovon nur eine richtig ist, d.h. dem Sendesignal entspricht. Genau genommen werden bei der Übertragung die Quadranten nicht vertauscht sondern rotiert. Es gibt mehrere Möglichkeiten den Anfangsquadranten zu erkennen. Die hier beschriebene Funktion "Sortierung\_vollst" verwendet zur Sortierung eine vollständige Initialfolge. Dabei handelt es sich um alle Werte des Symbolumfangs in aufsteigender Reihenfolge. In diesem Absatz wird die Funktion exemplarisch für 16QAM beschrieben. Das Prinzip lässt sich auf andere Modulationsarten übertragen. Eine Folge von 0 bis 15 wird einmal den gesamten Übertragungsdaten vorangesetzt. Dies geschah in der Funktion `Bild_einlesen`. Die Funktion `Sortierung_vollst` vergleicht die Initialfolge mit den ersten 16 empfangenen Symbolen. Werden diese richtig übertragen, so lässt sich aus ihnen ein symbolweiser Zuordnungsschlüssel bestimmen. Theoretisch reicht schon die Übertragung eines Initialsymbols, um zu erkennen, welche Zuordnung vorliegt. Im Laufe dieser Arbeit wurden mit fortschreitender Erkenntnis verbesserte Versionen der Sortierungsfunktion implementiert.

Die ersten 16 Symbole des Empfangssignals werden in den Vektor `Reihenfolge` geschrieben. Er enthält nun die empfangene Initialfolge. In der Darstellung des Vektors in einer MATLAB-Tabelle ist im Tabellenkopf die Indexfolge zu sehen (Abbildung 30). Sie geht von 1 bis 16. Die gesendete Initialfolge hingegen geht von 0 bis 15. Um von einem empfangenen, veränderten Symbol auf das gesendete Symbol zu schließen, wird der Index abgefragt und 1 subtrahiert. Dazu eignet sich die Funktion `find`, die den Index innerhalb des Reihenfolge-Vektors zu einem gegebenen Wert aus dem Empfangssignal liefert. Hierzu werden die Nutzdaten des Empfangssignals ab Index 17 mit den Werten des Reihenfolge-Vektors verglichen. Auf diese Weise findet die Rekonstruktion der Sendedaten statt. Der Algorithmus funktioniert auch, wenn keine Veränderung der Empfangsdaten gegenüber den Sendedaten vorliegt.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	4	5	6	7	0	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11	2	1

Abbildung 30: Darstellung der empfangenen Initialfolge (Spalte 1 bis 16) und Nutzdaten (Spalte 17 und 18) in einer Matlab-Tabelle

## 4.15 Funktion Bildrekonstruktion

Die Funktion `Bildrekonstruktion` ist das Gegenstück zur Funktion `Bild_einlesen`. Aus einem eindimensionalen Array wird ein dreidimensionales Array erzeugt, dass dem MATLAB-Bilddatenformat entspricht (Abbildung 31). Zuvor wird ähnlich wie bei `Bild_einlesen` nach drei Prinzipien eine Umwandlung der Empfangssymbole auf das 8-Bit-Format durchgeführt. Das Empfangssignal, das abhängig der Modulationsart auf einen bestimmten Symbolumfang reduziert wurde, wird nun in eine Dezimalfolge mit Werten zwischen 0 und 255 zurückgewandelt. 256QAM und 16QAM werden jeweils nach einem eigenen Prinzip umgewandelt. Für QPSK, 32-, 64- und 128QAM kommt ein gemeinsames Prinzip zum Einsatz.

```
18 - | i=1;
19 - | for l=1:3
20 - |     for j=1:Bild_Hoehe
21 - |         for k=1:Bild_Breite
22 - |             rekonstruiertes_Bild(j,k,l)=Rekonstruiertes_Signal_dec(i);
23 - |             i=i+1;
24 - |         end
25 - |     end
26 - | end
```

Abbildung 31: Rückwandlung des Bilddaten-Vektors in ein dreidimensionales Array

Am einfachsten gestaltet sich die Umwandlung wieder für 256QAM. Da der Wertumfang, mit dem ein Bildpunkt je Grundton codiert wird, exakt dem Symbolumfang der Konstellation entspricht, ist keine Umwandlung der Zahlenfolge nötig. Anhand der Informationen zur Länge und Breite des Bildes wird der Vektor mit einer dreifach geschachtelten for-Schleife in ein dreidimensionales Array umgewandelt.

Beim Einlesen des Bildes für 16QAM wurden zweistellige Hexadezimalzahlen in einstellige aufgetrennt. Bei der Rekonstruktion werden jeweils 2 einstellige Hexadezimalzahlen zu einer zweistelligen zusammengeführt (Abbildung 32). Zunächst wird das geordnete Signal, das dezimal vorliegt in das hexadezimale Zahlensystem umgewandelt. Als nächstes werden jeweils immer 2 Symbole in einen Vektor überschrieben. Diese Zweiervektoren sind in der Matrix `Rekonstruiertes_Signal_hex` zusammengefasst. Die Vektoren werden bei der Rückwandlung in das dezimale Zahlensystem von MATLAB als zweistellige Hexadezimalzahlen mit Werten zwischen 0 und FF interpretiert. Der Wertebereich der Dezimalzahlen nach der Umwandlung geht von 0 bis 255. Anschließend erfolgt mit der dreifachen for-Schleife die Rekonstruktion des dreidimensionalen Bilddaten-Arrays.

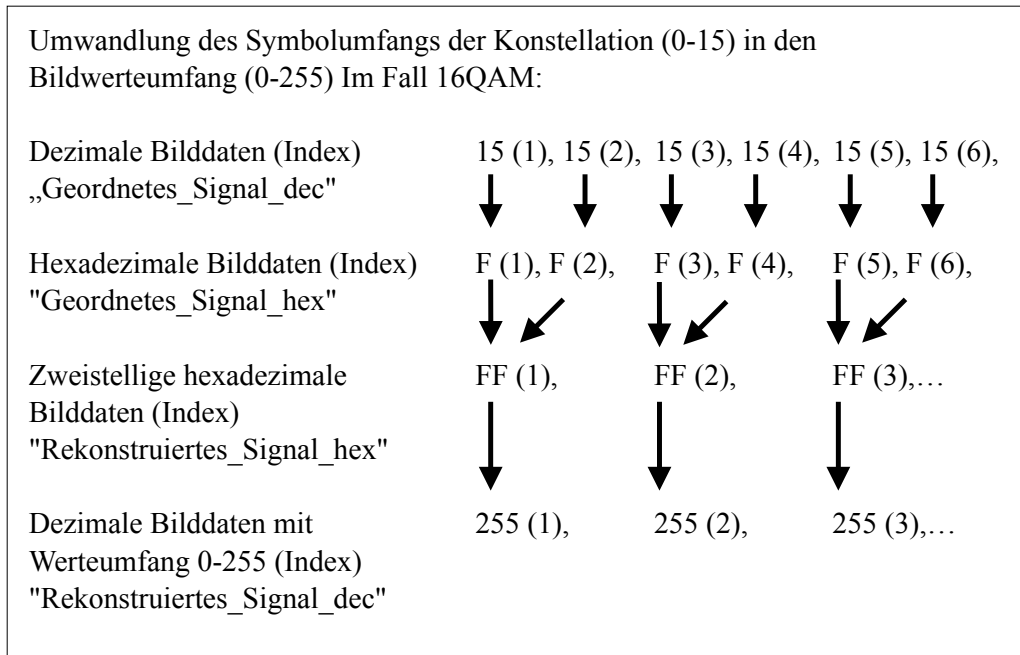


Abbildung 32: Rückwärtige Symbolanpassung bei 16QAM

Für die Bildrekonstruktion bei QPSK, 32-, 64- und 128QAM werden die empfangenen und geordneten Dezimalwerte in das binäre Zahlensystem umgewandelt. Die binäre Folge wird in 8-Bit-Blöcke aufgeteilt, die zu Dezimalzahlen zurückgewandelt werden. Ihr Wertebereich geht von 0 bis 255. Im Folgenden wird die Rekonstruktion beispielhaft für 128QAM beschrieben (Abbildung 33). Das dezimale geordnete Signal wird mit der Funktion `dec2bin` in 7 Bit lange Binärwerte umgewandelt. Diese Werte sind als 7-stellige Vektoren in der Matrix `Geordnetes_Signal_bin7` zusammengefasst. Mit einer zweifachen for-Schleife wird daraus eine Bitfolge ohne Aufteilung erzeugt. Beim Einlesen der Grafik wurde der Bilddaten-Vektor bei Bedarf verlängert. Im Fall von 128QAM musste sichergestellt werden, dass die Länge der Binärfolge ein Vielfaches von 7 beträgt um eine Blockaufteilung in 7 Bit zu ermöglichen. Die Verlängerung geschah durch das Anreihen von Nullen. Bei der Bildrekonstruktion wird eine mögliche Verlängerung nun wieder entfernt. Die sendeseitige Länge des binären Bilddaten-Vektors beträgt ein Vielfaches von 8, da die Farben 8-Bit-codiert sind. Die Länge der empfangenen Bitfolge wird durch 8 dividiert und abgerundet (Funktion `floor`) um die ursprüngliche Anzahl `L` an 8-Bit-Abschnitten festzustellen. Wird diese Anzahl mit 8 multipliziert, resultiert die Länge des unverlängerten Vektors `Laenge_Datenstrom_kurz`. Mit dieser Länge wird ein binärer Null-Vektor `Datenstrom_bin_kurz` erzeugt. In diesen werden die Daten aus dem verlängerten Datenstrom übertragen. Die anfängliche Länge ist jetzt wiederhergestellt. Mit einer zweifachen for-Schleife wird dieser Vektor in 8-Bit-Abschnitte unterteilt.

Umwandlung des Symbolumfangs der Konstellation (0-127) in den Bildwerteumfang (0-255) im Fall 128QAM:

Umwandlung der sortierten, dezimalen Empfangsdaten (0-127) aus dem Vektor "Geordnetes\_Signal\_dec" (Index) in das binäre Zahlensystem. Aufteilung in 7-Bit-Abschnitte. Speicherung in der Matrix "Geordnetes\_Signal\_bin5":

127 (1), 127(2), 112 (3),  $\longrightarrow$  1111111 (1), 1111111 (2), 1100000 (3),

Auflösung der 7-Bit-Aufteilung. Speicherung in "Datenstrom\_bin" (Anzahl Ziffern):

111111111111111100000 (21)

In der Funktion "Bild\_einlesen" wurde die Binärfolge ggf. verlängert. Falls zutreffend, wird diese Verlängerung nun rückgängig gemacht. Die Ursprungslänge wird festgestellt, indem durch 8 dividiert und abgerundet wird (grau markiert):

111111111111111100000 (20)  
|16 Symbole |

Speicherung des verkürzten Vektors in "Datenstrom\_bin\_kurz":

11111111111111 (16)

Teilung in 8-Bit-Abschnitte, gespeichert in "Datenstrom\_bin8" (Index):

11111111111111  $\longrightarrow$  1111111 (1), 1111111 (2),

Umgewandelte Dezimalfolge in "Rekonstruiertes\_Signal\_dec":

1111111 (1), 1111111 (2),  $\longrightarrow$  255 (1), 255 (2),

Abbildung 33: Rückwärtige Symbolanpassung bei 128QAM

Die 8-Bit-Abschnitte werden in Dezimalwerte zwischen 0 und 255 zurückgewandelt. Eine dreifach geschachtelte for-Schleife stellt aus dem Dezimalvektor das dreidimensionale Bilddaten-Array wieder her.

## 4.16 Funktion Fehlerauswertung

Die Funktion **Fehlerauswertung** überprüft das sortierte Empfangssignal auf Übertragungsfehler. Als Referenz dient das Sendesignal. Diese Fehlerauswertung in MATLAB ergänzt die Fehlerauswertung des Analyzers in der Tabelle Modulation Accuracy. Die Analyzer-Auswertung orientiert sich nicht am Sendesignal. Somit sind die Ergebnisse weniger exakt. Tritt ein empfangenes Signal zwischen den Konstellationspunkten auf, wird der nächstgelegene Punkt als Sendesymbol angenommen. Sämtliche Fehlerangaben bei Modulation Accuracy beziehen sich auf die Abweichungen von angenommenen Idealpunkten. Damit werden all diejenigen Fehler bewertet, die nicht zu einem Symbolfehler führen. Im Fall eines Symbolfehlers ist die Analyzer-Auswertung inkorrekt, da ein falscher Bezugspunkt gewählt wird. Die Fehlerauswertung in MATLAB gibt keine exakte Abweichung vom Konstellationspunkt an, sie informiert hingegen über Symbolfehler. Es ist anzumerken, dass eine solche Fehlerauswertung im praktischen Anwendungsfall nicht funktionieren würde. Der Grund liegt darin, dass der Empfangseinheit keine weiteren Informationen über die Sendedaten vorliegen. In dieser Arbeit hingegen sind Quelle und Senke im gleichen Programm auf demselben Rechner.

Die Funktion **Fehlerauswertung** überprüft Empfangsdaten, die hinsichtlich einer möglichen Quadrantenrotation schon korrigiert wurden. Da in der Funktion **Bild\_einlesen** eine Initialfolge vor die Bilddaten gefügt wurde, wird eine Entfernung dieser durchgeführt. Mit einer if-Abfrage innerhalb einer for-Schleife wird die symbolweise Übereinstimmung geprüft. Bei jeder Ungleichheit wird die Zählvariable **Fehleranzahl** um 1 inkrementiert. Zur Berechnung der Symbolfehlerrate wird die Fehleranzahl durch die Symbolanzahl der reinen Bilddaten dividiert. Die Ermittlung der Symbolfehlerrate hat einen zusätzlichen Informationswert. Begründet werden kann dies mit der variablen Symbolanzahl abhängig der Modulationsart. Diese Anzahl kann selbst bei gleicher Dateigröße variabel sein. Beim Einlesen des Bildes wurde eine Anpassung der 8-Bit-Werte auf den Wertebereich einer Konstellation vorgenommen. Je kleiner dieser Wertebereich ausfällt, desto größer wird die Anzahl zu übertragender Symbole. Einer gleichbleibenden Fehleranzahl kommt abhängig der Symbolanzahl ein unterschiedliches Gewicht zu.

## 4.17 Anzeige des empfangenen Bildes

Der Datentyp des rekonstruierten Bildes wird von `double` in `uint8` umgewandelt. Nur dieser Datentyp kann von der Funktion `imshow` gelesen werden. Anfangs wurde beim Einlesen durch `imread` ebenfalls der Datentyp `uint8` verwendet. Mit dem Befehl `subplot(1,3,3)` wird das empfangene Bild an der 3. Stelle im Ausgabefenster platziert.

## 4.18 Ausgabe einer Tabelle zur Übertragungsgenauigkeit

Für das Fenster `g` werden Beschriftung, Position und Größe festgelegt. In diesem Fenster wird die Fehlertabelle `Accuracy_table` angegeben. Der Funktion `Accuracy_table` wird der Vektor `Accuracy` übergeben. Er besteht aus 5 Messgrößen, die Auskunft zur Übertragungsgenauigkeit liefern. Dieser Vektor wurde mit der Funktion `Mod_Accuracy` innerhalb der Funktion `Auteilen_Senden_Empfangen` zuvor erzeugt. Die 5 Größen dieses Vektors werden in der Tabelle angezeigt. Zusätzlich erfolgt eine Tabellenanzeige der Fehleranzahl und der Symbolfehlerrate.

## 4.19 Programmablauf mit blockweiser Überprüfung der Initialfolge

Bei größeren Konstellationen war es nicht mehr möglich, die Initialfolge vollständig korrekt zu übertragen. Ab 64QAM traten Übertragungsfehler in der Initialfolge auf, die sich auch durch Pegelanpassung nicht vermeiden ließen. Für eine Sortierung mit der bisherigen Funktion ist für den Fall 64QAM eine Symbolfolge von 0 bis 63 nötig, die bis auf eine Quadrantenrotation unverändert empfangen werden muss. Jeder Symbolfehler macht eine korrekte Sortierung damit unmöglich. Mit einer Sortierungs-Funktion, die sich an der Blocksequenz der Initialfolge orientiert, ist nur die korrekte Übertragung von 4 Blockanfangssymbolen notwendig. Übertragungsfehler anderer Symbole der Initialfolge sind nicht von Bedeutung. Sendeseitig wird eine vollständige Initialfolge übertragen. Auf der Empfangsseite werden allerdings nur die Blockanfangssymbole geprüft. Für einen Programmablauf mit blockweiser Überprüfung der Initialfolge sind Veränderungen an den Funktionen `Aufteilen_Senden_Empfangen` und `Sortierung` vorzunehmen. In der ersten Funktion ist die Überprüfung einer korrekt übertragenen, vollständigen Initialfolge zu deaktivieren. Für die zweite Funktion wurde eine weitere Datei mit der Kennzeichnung "blockw" angelegt. In der Funktion `Sortierung_Blockw_16QAM` werden nur die Blockanfangssymbole aufgerufen und zu einer vollständigen Initialfolge ergänzt, mit welcher dann nach dem herkömmlichen Prinzip eine Sortierung durchgeführt wird. Im Fall von 16QAM werden die Blockanfangssymbole mit den Indizes 1, 5, 9 und 13 aufgerufen. Die Indexierung beginnt mit 1. Es können an diesen Stellen die Werte 0, 4, 8 und 12 stehen. Hinter den aufgerufenen Symbolen werden jeweils 3 aufsteigende Zahlen

angereiht. Wird beispielsweise bei `Empfangssignal(1)` eine 4 aufgerufen, so beginnt der Vektor `Reihenfolge`: 4, 5, 6, 7. Die künstlich generierte, vollständige Initialfolge ist nur dann inkorrekt, wenn ein Blockanfangssymbol nicht richtig übertragen wurde. Modulationsarten ab 64QAM lassen sich aufgrund der hohen Symbolfehlerrate nur anhand der Blockanfangssymbole rekonstruieren. Bei 64QAM machen die Blockanfangssymbole einen Anteil von  $\frac{4}{64} = 6,25\%$  aus. Es ist ersichtlich, dass dieser Anteil mit zunehmender Konstellationsgröße abnimmt. Allerdings treten umso höhere Symbolfehlerraten auf, je größer die Konstellation ist. Eine blockweise Überprüfung ermöglicht zwar eine Sortierung bei höherer Fehleranzahl, kann aber Symbolfehler in den Nutzdaten nicht korrigieren. Bei den Modulationsarten QPSK, 16- und 32QAM ist eine blockweise Überprüfung nur bei geringem Störabstand notwendig. Bei guter Signalqualität ist die Übertragung einer vollständigen Initialfolge möglich.

## 4.20 Programmablauf ohne Sortierung

In Versuchsmessungen mit großen Konstellationen (ab 64QAM) und niedrigen Leistungspegeln ( $< -60\text{dBm}$  auf Empfangsseite) war es teilweise nicht möglich, die Blockanfangssymbole korrekt zu Übertragen. Für diese Fälle wurde die Sortierungsfunktion vorübergehend vollständig deaktiviert. Diese Maßnahme ist sinnvoll, um anhand einer Betrachtung des Empfangsbildes die Übertragungsqualität zu beurteilen. Die Wahrscheinlichkeit beträgt  $\frac{1}{4}$ , dass ohne Korrektur der richtige Anfangsquadrant vorliegt. Bei falscher Zuordnung ist es möglich, aufgrund der menschlichen Fähigkeit zur Mustererkennung eine Einschätzung zur Fehlerrate abzugeben. Die Funktion `Fehlerauswertung` liefert in diesem Fall keine repräsentativen Ergebnisse, da sie die absolute Übereinstimmung von Symbolen wertet. Wenn eine vollständige Initialfolge zur Sortierung verwendet wird, findet bei einem Fehler in der Initialfolge gar keine Übertragung statt. Dazu wurde eine Überprüfung implementiert, die innerhalb der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` durchgeführt wird. Im Fall von Fehlern in der Initialfolge treten Symbole mehrfach auf. Dieses Mehrfachvorkommen wird bei der Überprüfung erkannt, wodurch ein Programmabbruch ausgelöst wird, noch bevor die Bilddaten übertragen werden. Wird diese Überprüfung deaktiviert, kommt es im Fehlerfall ebenfalls zu keiner Anzeige des Empfangsbildes und eine MATLAB-Fehlermeldung erscheint erst nach der Übertragungszeit. Die Meldung bezieht sich auf einen Fehler in der Sortierungsfunktion. Die Funktion `find` findet mehrere gleiche Symbole in der Initialfolge obwohl nur eines erwartet wird.

## 4.21 Bildübertragung mit abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur

Die Gesamtmenge der Symbole, die durch das Einlesen einer Datei entsteht, wird abschnittsweise übertragen. Bei 16QAM sind für ein Bild der Auflösung 128x128, 98 320 Symbole zu übertragen. Häufig wird dabei eine Abschnittlänge von 2700 gewählt. Mit der Division  $98320/2700 = 36,41$  lässt sich die Anzahl an Übertragungsabschnitten berechnen. 37 Abschnitte werden in diesem Fall übertragen, da keine halben Abschnitte verwendet werden und der letzte Abschnitt mit Nullen aufgefüllt wird. Bisher wurde auf der Sendeseite nur eine einzige Prüffolge vor die Gesamtmenge aller Übertragungssymbole gesetzt. Auch auf der Empfängerseite wird nur einmal je Gesamtübertragung die Initialfolge geprüft. Die erkannte Quadrantenzuordnung wird für die Übertragung der gesamten Datei beibehalten, womit die Sortierung erfolgt. In Analysemessungen wurde erkannt, dass die Quadrantenzuordnung innerhalb einer Gesamtübertragung zeitweise wechselt. Dabei fand in keinem Fall ein Wechsel innerhalb eines Übertragungsabschnittes statt (innerhalb der 2700 Symbole). Die Wechsel erfolgten nur zwischen den Abschnitten. Vor allem eine Veränderung in der Sendeleistung bewirkte Quadrantenwechsel. Im Praxisfall kommt dies zum Tragen, wenn sich die Sendeleistung nahe einer Wechselschwelle befindet. Auch eine Antennenübertragung kann zu Leistungsschwankungen und Quadrantenwechsel führen. Ein dritter Fall für Quadrantenwechsel betrifft den Datenempfang mit interner Referenzfrequenz. Wurde die Übermittlung der Referenzfrequenz vom Generator zum Analyzer unterbrochen, so waren im Analyzer-Display zahlreiche Quadrantenwechsel zu erkennen. Vor jeder Übertragung mit interner Referenzfrequenz findet eine Frequenzübernahme aus dem Sendesignal statt. Der Generator überträgt dazu vorübergehend einen nichtmodulierten Träger. Trotz dieser Maßnahme fiel die Übertragungsqualität deutlich schlechter aus, gegenüber der Verwendung einer externen Referenzfrequenz. Die Anzahl an Bildfehlern war sichtbar erhöht. Außerdem traten eine hohe Symbolfehleranzahl und -rate auf.

In einer optimierten Variante des Korrekturprozesses soll eine abschnittsweise Überprüfung stattfinden. Vor jeden Übertragungsabschnitt wird Sendeseitig eine reduzierte Initialfolge gesetzt. Diese besteht nur aus den 4 Blockanfangssymbolen, im Fall 16QAM: 0, 4, 8, 12. Empfangsseitig wird eine Prüfung der Initialfolge in jedem Abschnitt durchgeführt. Die erkannte Quadrantenzuordnung wird nur für einen Abschnitt beibehalten und der Sortierung zugrunde gelegt. Für eine abschnittsweise 4-Symbol-Korrektur sind Veränderungen in vielen Funktionen des Programms notwendig. Daher wurde eine separate Gesamtdatei angelegt, die auf die speziellen Funktionen zugreift. Alle betroffenen Dateien sind mit "4Sym" gekennzeichnet. Die Dateien sind im selben Ordner einer Modulationsart untergebracht.



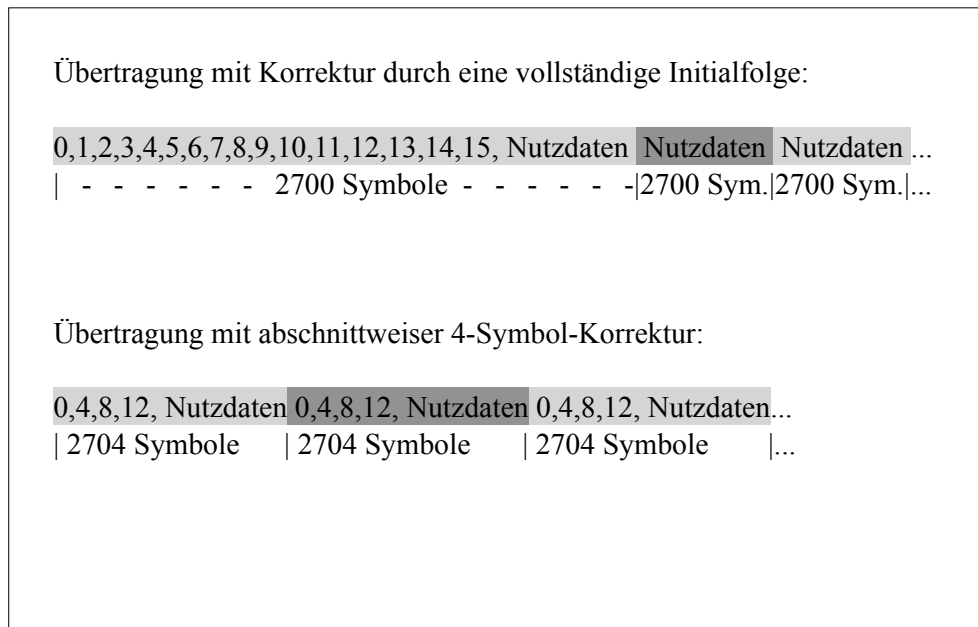


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Datenstrukturen einer Überprüfung mit vollständiger Initialfolge und abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur im Fall 16QAM.

#### 4.21.1 Funktion Gesamtdatei\_4Sym16QAM

Im Folgenden wird die Übertragung mit abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur beispielhaft mit 16QAM dargestellt. Es werden nur diejenigen Funktionen beschrieben, die sich zum bisherigen Programmablauf unterscheiden. In der `Gesamtdatei_4Sym16QAM` wird mit der Funktion `Bild_einlesen_ohne_Init_16QAM` das Bild eingelesen ohne eine Initialfolge davor hinzuzufügen. Die Funktion wandelt das dreidimensionale Bilddaten-Array `Bild` in einen eindimensionalen Vektor `Bilddaten` um. Bisher wurde innerhalb dieser Funktion eine Initialfolge vor den gesamten Bilddaten-Vektor gesetzt. Da nun vor jedem Übertragungsabschnitt eine Prüffolge eingefügt werden soll, wird diese Aufgabe am besten innerhalb der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen_4Sym16QAM` ausgeführt (Abbildung 35). Diese Funktion gibt nun zusätzlich die Anzahl der Wechsel zwischen den Quadrantenzuordnungen zurück.

#### 4.21.2 Funktion Aufteilen\_Senden\_Empfangen\_4Sym16QAM

Am Anfang der Funktion wird der SCPI-Befehl für die Aufzeichnungslänge des Analyzers erzeugt. Die Aufzeichnungslänge wird für die Prüfsymbole um 4 vergrößert. Die gesamte Symbolfolge wird in Abschnitte unterteilt und Vektorweise in der `Bilddaten_matrix`

gespeichert. Anschließend werden die Bilddaten abschnittsweise übertragen. Dabei werden die ersten 4 Indizes des zu übertragenden Signalteils mit den Blockanfangssymbolen 0, 4, 8 und 12 beschrieben. Ab Index 5 erfolgt eine Beschreibung mit den Nutzdaten. Der aktuelle Übertragungsabschnitt mit Prüfsymbolen wird **Signalteil\_Init** genannt.

Es soll zusätzlich ermittelt werden, wieviel Quadrantenwechsel während einer Übertragung zustande kommen. Dazu wird kontrolliert, ob sich die Prüfsymbole des aktuellen Empfangsabschnitts in der Reihenfolge von denen des vorherigen Abschnittes unterscheiden. Dies wird mittels Differenzbildung festgestellt. Nach Senden und Empfang des ersten Übertragungsabschnittes ( $i=1$ ), wird der empfangene Abschnitt **E** in einer Ablage gespeichert. Erst ab dem zweiten Übertragungsabschnitt ( $i>1$ ) liegt ein vorangegangener Abschnitt vor, der zur Überprüfung auf Quadrantenwechsel herangezogen werden kann. Von den Prüfsymbolen des vorangegangenen Abschnitts **E\_Ablage(1...4)** werden die aktuell empfangenen Prüfsymbole **E(1...4)** subtrahiert. Für den Fall, dass kein Quadrantenwechsel eintrat, besteht der Differenzvektor **Diff** aus 4 Nullen. Ist dies nicht der Fall, wird dies als Quadrantenwechsel gewertet und die Zählvariable **Wechsel** um 1 inkrementiert. Der aktuelle Empfangsabschnitt **E** wird für den nächsten Übertragungsschritt in die Ablage gespeichert. Die Variable **Wechsel** wird von der Funktion **Aufteilen\_Senden\_Empfangen\_4Sym16QAM** zurückgegeben. Die Sortierung findet nun auch innerhalb dieser Funktion statt. Dies ist vorteilhaft, da die aktuelle Funktion auch für das Zusammensetzen der Übertragungsabschnitte zuständig ist und eine abschnittsweise Sortierung stattfindet. Somit wird die Sortierung vor der Zusammensetzung durchgeführt. Die Verwendung einer Sortierungsfunktion in der Gesamtdatei wie bisher, hätte zur Folge, dass das zusammengesetzte Signal wieder aufgetrennt werden müsste. In der neuen Version wird der aktuelle Empfangsabschnitt **E** an die Funktion **Sortierung\_4Sym\_16QAM** übergeben. Aus den erhaltenen sortierten Abschnitten **E\_sort** wird das Gesamtsignal wieder zusammengesetzt.

#### 4.21.3 Funktion Sortierung\_4Sym\_16QAM

Der Funktion **Sortierung\_4Sym\_16QAM** werden die Nutzdaten des aktuellen Empfangsabschnitts übergeben, dem 4 Prüfsymbole vorausgehen. Da es sich dabei um Blockanfangssymbole handelt, wird jedes Symbol zu einem Block bzw. Quadranten ergänzt. Zu einem empfangenen Symbol werden 3 aufsteigende Zahlenwerte angereiht. Auf diesem Weg werden die empfangenen Blockanfangssymbole zu einer vollständigen Initialfolge ergänzt, womit nach dem bisherigen Prinzip die Sortierung erfolgen kann. Ab Index 5 werden die Nutzdaten des Empfangssignals mit dem Reihenfolge-Vektor verglichen. Die Funktion **find** liefert zu einem gegebenen Wert aus dem Empfangssignal den zugehörigen Index des Reihenfolge-Vektors. Wird davon 1 subtrahiert erhält man den korrigierten Wert, wie er auf der Generatorseite ausgesendet wurde. Eine Kontrolle, ob die Prüfsymbole

richtig übertragen wurden, findet nun innerhalb der Sortierungsfunktion statt. In der vorherigen Ausführung wurde dies innerhalb der Funktion `Aufteilen_Senden_Empfangen` überprüft. Es fand vor der Gesamtübertragung eine einmalige Kontrolle der Initialfolge statt. Dies war möglich, da eine einzelne Initialfolge für die Sortierung der ganzen Übertragung galt. Wurde eine inkorrekte Übertragung der Initialfolge festgestellt, kam kein Übertragungsprozess von Nutzdaten zustande. Bei der 4-Symbol-Korrektur gilt eine Initialfolge nur für einen Übertragungsabschnitt. Somit ist es möglich, dass in jedem Abschnitt ein Übertragungsfehler in den Prüfsymbolen eintreten kann. Die Übertragung findet so weit statt, bis ein Fehler in der Prüffolge enthalten ist. Dazu wird überprüft, ob für den aktuellen Index  $k$  der sortierten Daten mehr als eine Zuordnung im Reihenfolgevektor gefunden werden konnte. Ist dies der Fall wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Funktion abgebrochen.

#### **4.21.4 Funktion `Fehlerauswertung_4Sym16QAM2`**

Die bisherige Funktion zur Fehlerauswertung entfernte die Initialfolge vor dem Bilddatenvektor. Die Funktion zum Einlesen des Bildes setzte eine einmalige Initialfolge vor die Bilddaten. Bei der Übertragung mit abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur wird zum Einlesen des Bildes die Funktion `Bild_einlesen_ohne_Init_16QAM` verwendet. Diese Funktion setzt keine Initialfolge vor die Bilddaten. Somit führt die neue Funktion `Fehlerauswertung_4Sym16QAM` keine Entfernung der Initialfolge mehr aus. Dies ist der einzige Unterschied zur bisherigen Fehlerauswertung.

#### **4.21.5 Funktion `Accuracy_table4Sym`**

In der Tabelle zur Übertragungsgenauigkeit wird nun auch die Anzahl vollzogener Quadrantenwechsel "Wechsel" angezeigt.

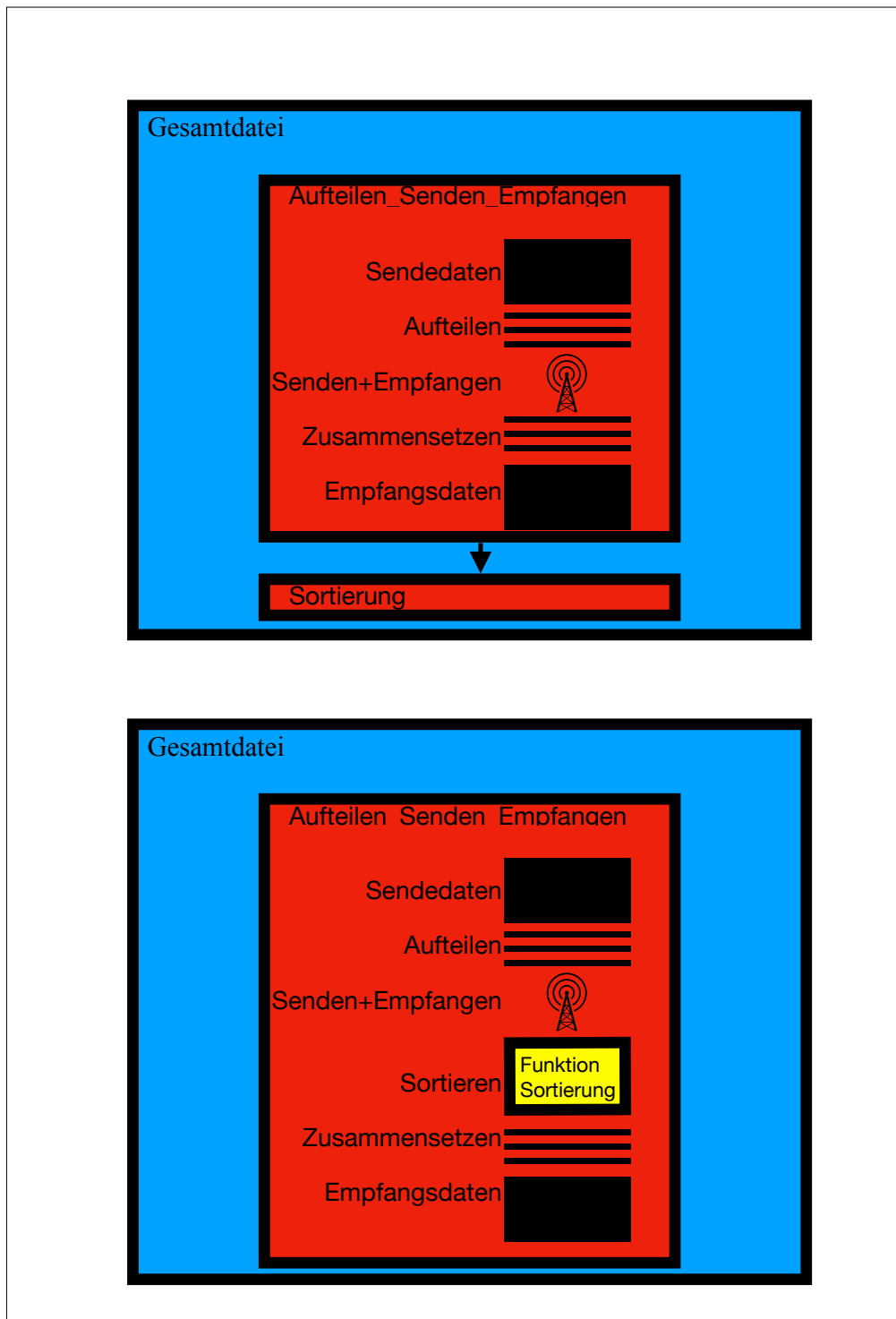


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Programmstruktur einer Überprüfung mit vollständiger Initialfolge (oben) und abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur (unten)

## 5 Dokumentation der Übertragungen und Messungen

In diesem Kapitel werden aus verschiedenen Konfigurationen Übertragungsbilder und Messwerte vorgestellt und beurteilt. Es wird analysiert, wie sich die Variation unterschiedlicher Parametern auf das Ergebnis auswirkt. Übertragungen mit individuellen Konstellationen, mit verschiedenen Dateiformaten und mit benutzerdefinierten Filtern sowie Übertragungen ohne Trigger-Leitung sind in separate Kapitel ausgelagert.

### 5.1 Variation des Leistungspegels am Signalgenerator R&S SMJ100A

Diese Übertragung wurde sowohl mit Kabel als auch mit Antenne durchgeführt. Es wurde ein 128x128-Grafik des MATLAB-Bilddatenformats versandt. Bei der Demodulation von 16QAM (DVB-C) erfolgte die Rotationskorrektur mit einer vollständigen Initialfolge (0 bis 15). Für eine aussagekräftige Fehlerauswertung muss die Quadrantenordnung korrigiert sein. Die Verringerung der Sendeleistung führt zu einer Zunahme an Symbolfehlern. Es wird eine Grenze erreicht, wenn die Initialfolge nicht mehr richtig übertragen wird und keine Quadrantenkorrektur mehr erfolgen kann. Ohne diese ist eine Auswertung von Symbolfehlern nicht repräsentativ. Weiterhin können jedoch die Fehlergrößen von Modulation Accuracy ermittelt werden.

#### 5.1.1 Variation der Sendeleistung bei einer Antennenübertragung

Die Generator-Pegel bewegen sich im Bereich der unteren Leistungsschwelle, ab der keine Übertragung mehr möglich ist.

##### Konfiguration Antennenübertragung:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 8 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	für Mod. Accuracy 6...11 dBm, für Fehleranzahl 6...15 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	-20 dBm
Modulationsart:	16QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. und Trigger des Analysators:	beide extern
Aufzeichnungslänge:	2700 Symbole

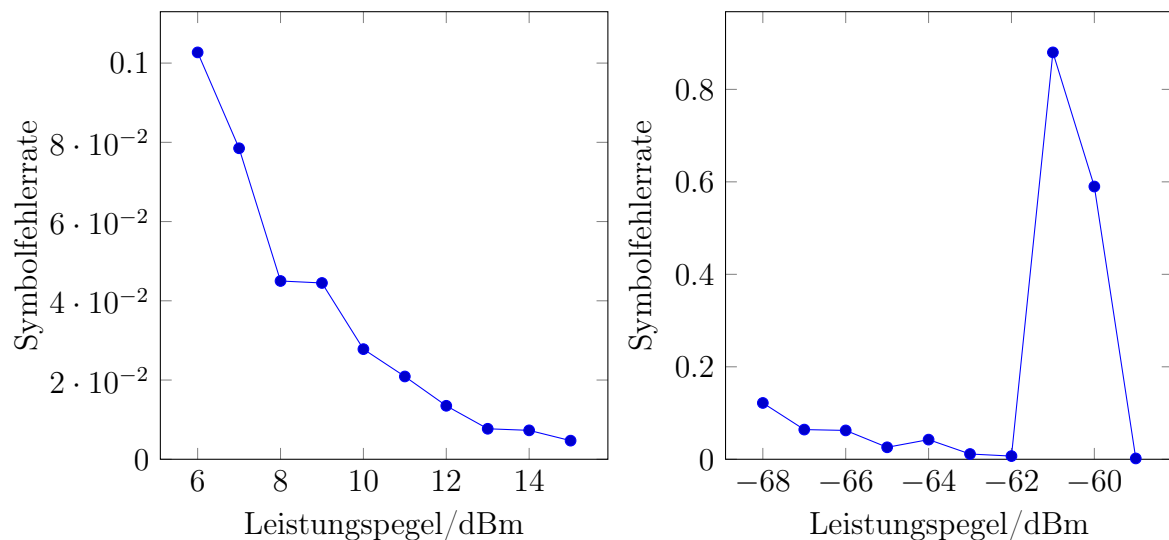


Abbildung 36: Symbolfehlerrate in Abhängigkeit des Sendepiegels. *Links:* Antennenübertragung *Rechts:* Kabelübertragung

### 5.1.2 Variation der Sendeleistung bei einer Kabelübertragung

Für die Kabelübertragung wurden die Sendepegel so gewählt, dass sie zu den gleichen Empfangsleistungen führen wie bei der Antennenübertragung. Bei der Antenne führten Sendepegel von 6 bis 11 dBm zu Empfangspegeln von -73 bis -68 dBm. Ebendiese Empfangsleistungen konnten bei einer Kabelübertragung mit Sendepiegeln von -68 und -63 dBm erreicht werden.

#### Konfiguration Kabelübertragung:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepegel:	für Mod. Accuracy -68...-63 dBm, für Fehleranzahl -68...-59 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	-20 dBm
Modulationsart:	16QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. und Trigger des Analysators:	beide extern
Aufzeichnungslänge:	2700 Symbole

Sendepiegel (dBm)	EVM (%)	Magnitude_ Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_ Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehler- anzahl	Symbol- fehlerrate
6	22,6493	11,7830	12,8454	9,8735	-73,7602	10098	0,1027
7	21,1387	11,2531	12,0204	9,1198	-72,8708	7714	0,0785
8	19,3827	10,3642	11,0021	8,3526	-71,2728	3993	0,0406
9	18,6524	10,0343	10,4960	8,0993	-70,5471	2973	0,0302
10	17,9487	9,7003	10,0398	7,8202	-69,7632	2160	0,0220
11	17,3684	9,4170	9,6693	7,5902	-68,9455	1630	0,0166

Sendepiegel (dBm)	EVM (%)	Magnitude_ Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_ Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehler- anzahl	Symbol- fehlerrate
-68	21,1845	11,2863	12,0535	9,1359	-73,1619	11974	0,1218
-67	20,1623	10,7447	11,4700	8,6646	-72,2139	6308	0,0642
-66	19,0756	10,2386	10,7785	8,2584	-71,2020	6134	0,0624
-65	18,2745	9,8395	10,2751	7,9366	-70,3383	2542	0,0259
-64	17,4150	9,4261	9,6961	7,5999	-69,3489	4176	0,0425
-63	16,6925	9,0968	9,2215	7,3386	-68,3772	1116	0,0114

Tabelle 1: Fehlergrößen in Abhängigkeit der Sendeleistung. *Oben:* Antennenübertragung.  
*Unten:* Kabelübertragung.

Bei beiden Übertragungsmedien nehmen sowohl die Fehlergrößen von Modulation Accuracy (EVM bis Mean Power) als auch die Fehleranzahl und Symbolfehlerrate mit ansteigender Sendeleistung ab. Das bedeutet, dass der Analysator für diesen Fall die Fehlergrößen, die anhand eines rekonstruierten Signals berechnet werden, richtig ermittelt hat. In Abbildung 36 ist für die Kabelübertragung bei den Sendepiegeln -61 und -60 dBm kurzzeitig ein starker Anstieg der Symbolfehlerrate zu erkennen. Dabei handelt es sich um einen Schwellenbereich, in dem der Analysator zwischen verschiedenen Quadrantenzuordnungen ständig wechselt. Die Rotationskorrektur orientiert sich bei dieser Übertragung nur an der Zuordnung des ersten Übertragungsabschnitts. Verändert sich diese Zuordnung andauernd, so werden viele Abschnitte nicht richtig korrigiert.

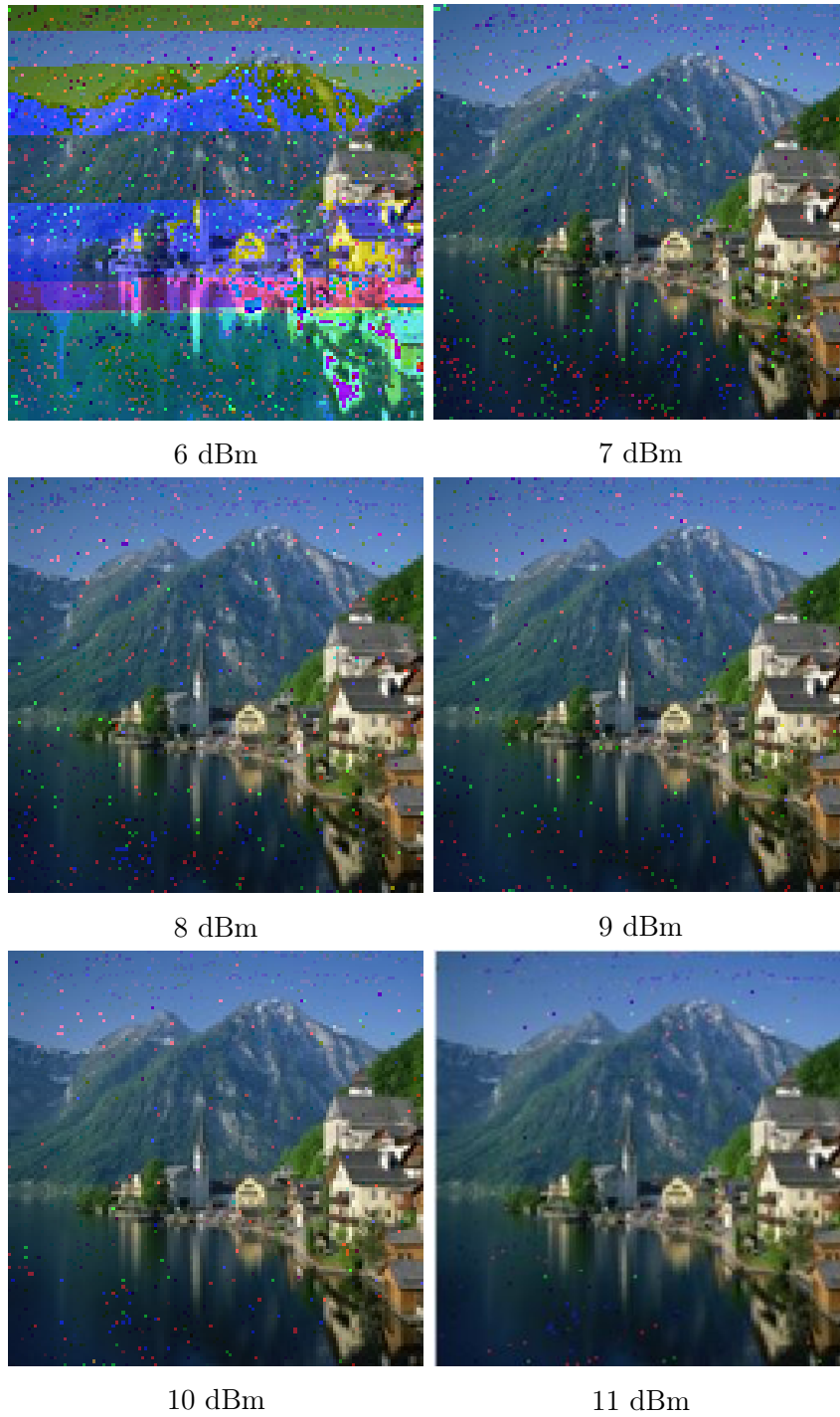


Abbildung 37: Empfangsbilder bei Leistungsvariation und Antennenübertragung [36]



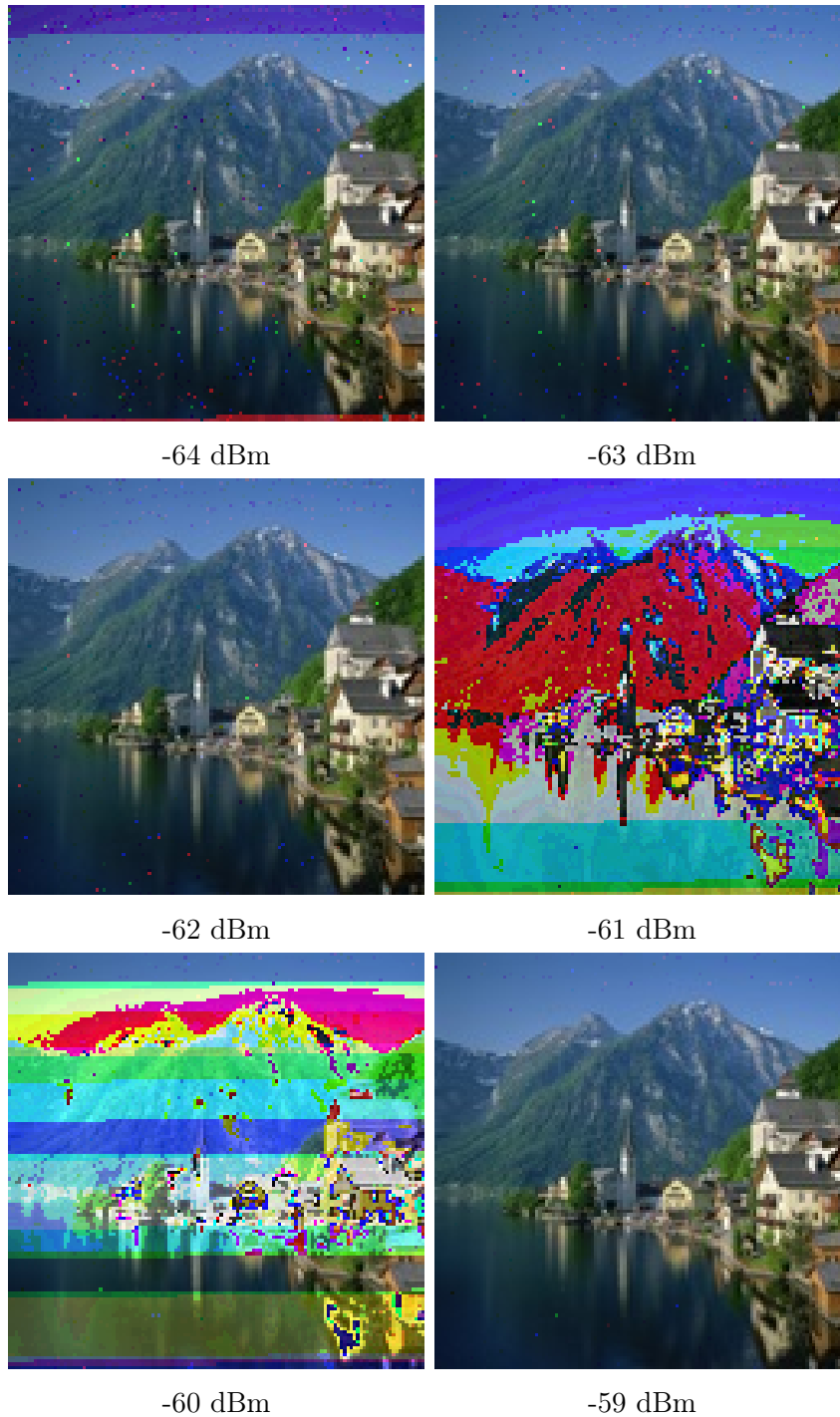


Abbildung 38: Empfangsbilder bei Leistungsveriaration und Kabelübertragung [36]

## 5.2 Variation der Modulationsart

Für die Übertragung mit verschiedenen Modulationsarten wurde eine verkürzte Aufzeichnungslänge von 2000 Symbolen eingestellt, die bei allen Modulationen sicher funktioniert.

### Konfiguration der Messung:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 8 m) und Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	für Antenne +15 dBm, für Kabel -20 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	-20 dBm
Modulationsart:	QPSK, 16- bis 256QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. und Trigger des Analysators:	beide extern
Aufzeichnungslänge:	2000 Symbole

Modulationsart	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
16QAM	13,6031	7,6921	7,1269	6,273	-35,9536	313	0,0032
32QAM	9,4055	5,0021	5,271	3,9022	-35,4709	482	0,0061
64QAM	10,2383	4,6691	6,4947	3,7362	-35,4462	7270	0,1109
128QAM	10,4548	4,799	6,2374	3,7936	-35,3189	54516	0,9705
256QAM	6,0647	2,7832	3,4981	2,2484	-34,9278	20264	0,4123
QPSK	11,1297	7,8416	4,529	6,3858	-35,6434	0	0

Modulationsart	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
16QAM	14,4924	8,0828	7,7179	6,5654	-60,5861	1974	0,0201
32QAM	10,4683	5,5528	5,9679	4,3514	-60,4122	2627	0,0334
64QAM	12,0956	5,5982	7,7978	4,5625	-66,4377	18289	0,2791
128QAM	10,3017	4,829	6,1627	3,8445	-63,358	33643	0,5989
256QAM	6,4687	2,9863	3,7039	2,3972	-48,7551	30903	0,6287
QPSK	11,7941	8,3187	4,8035	6,7567	-58,4123	0	0

Tabelle 2: Fehlergrößen in Abhängigkeit der Modulationsart. *Oben:* Kabelübertragung.  
*Unten:* Antennenübertragung.

Erwartungsgemäß ist ein Anstieg der Symbolfehlerrate mit zunehmendem Modulationsgrad zu beobachten. Zudem führte die Kabelübertragung zu geringeren Fehleranzahlen. Für die Antennenübertragung wurde der Generator-Pegel mit einem maximal möglichen Wert von +15 dBm eingestellt. Die modulationsabhängige Zunahme der Fehler lässt sich durch eine Verkleinerung der Symbol-Entscheidungsbereiche im Konstellationsdiagramm erklären. Gleichzeitig wird der Rauschabstand konstant gehalten. Bei QPSK sind die Entscheidungsbereiche am größten, was zu einer fehlerfreien Übertragung sowohl mit Kabel als auch mit Antenne geführt hat. Gleichzeitig ist die Abweichung von den Zentren der Entscheidungsbereiche am größten, woraus der höchste EVM-Wert resultiert. Die Übertragung dauert bei QPSK am längsten, da aufgrund des kleinen Wertebereichs mehr Symbole versendet werden müssen. Die Verarbeitungszeit des Analysators ist bei größeren Konstellationen länger, was ein weiterer Einflussfaktor für die Fehlerzahl ist. Die Integration von Pausen kann hierbei zu einer Verringerung der Fehlerrate führen. Die höchste Symbolfehlerrate trat bei einer Kabelübertragung mit 128QAM ein, obwohl der Maximalwert für Antenne und 256QAM erwartet wurde. Offensichtlich streut die Symbolfehlerrate stark. So ist die höhere Fehleranzahl beim Kabel wahrscheinlich ein Zufallsergebnis. Für mehr Aussagekraft kann eine Wiederholung mit mehreren Einzelmessungen durchgeführt werden, woraus der Mittelwert bestimmt wird.

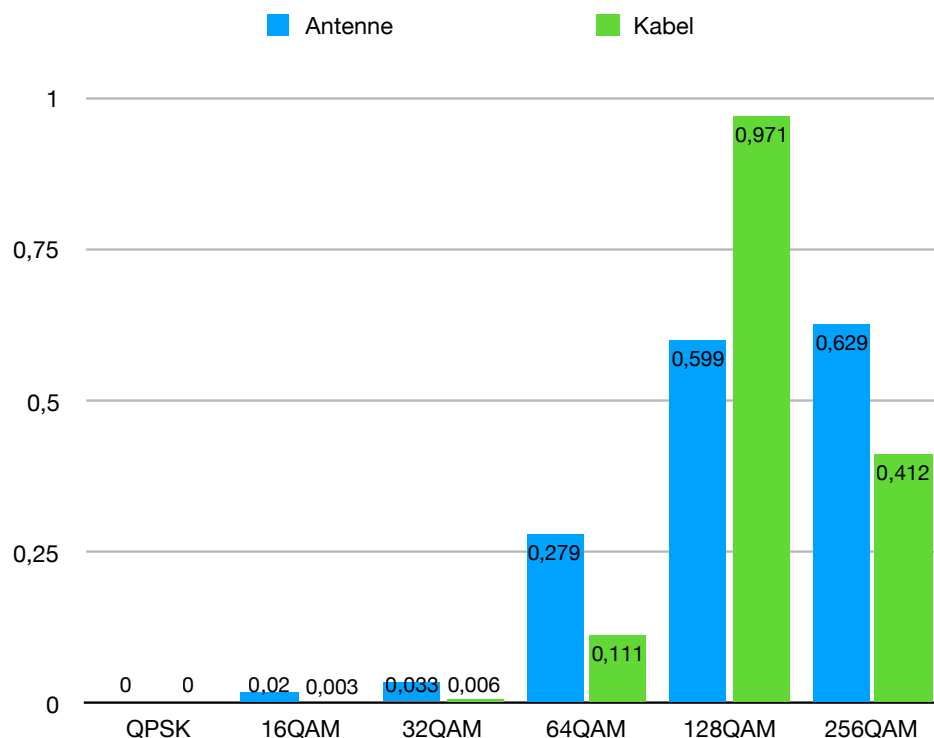


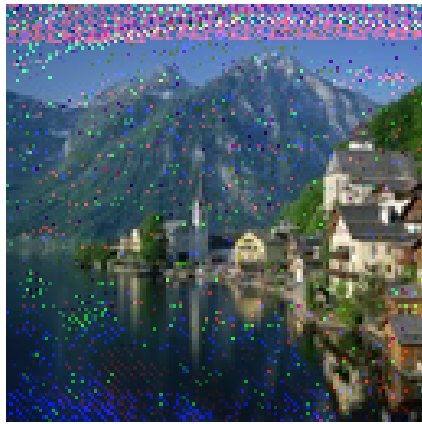
Abbildung 39: Symbolfehlerrate in Abhängigkeit der Modulationsart



16QAM



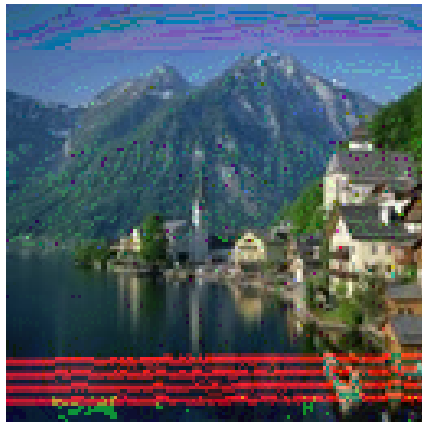
32QAM



64QAM



128QAM



256QAM



QPSK

Abbildung 40: Empfangsbilder bei Variation der Modulationsart und Kabelübertragung [36]

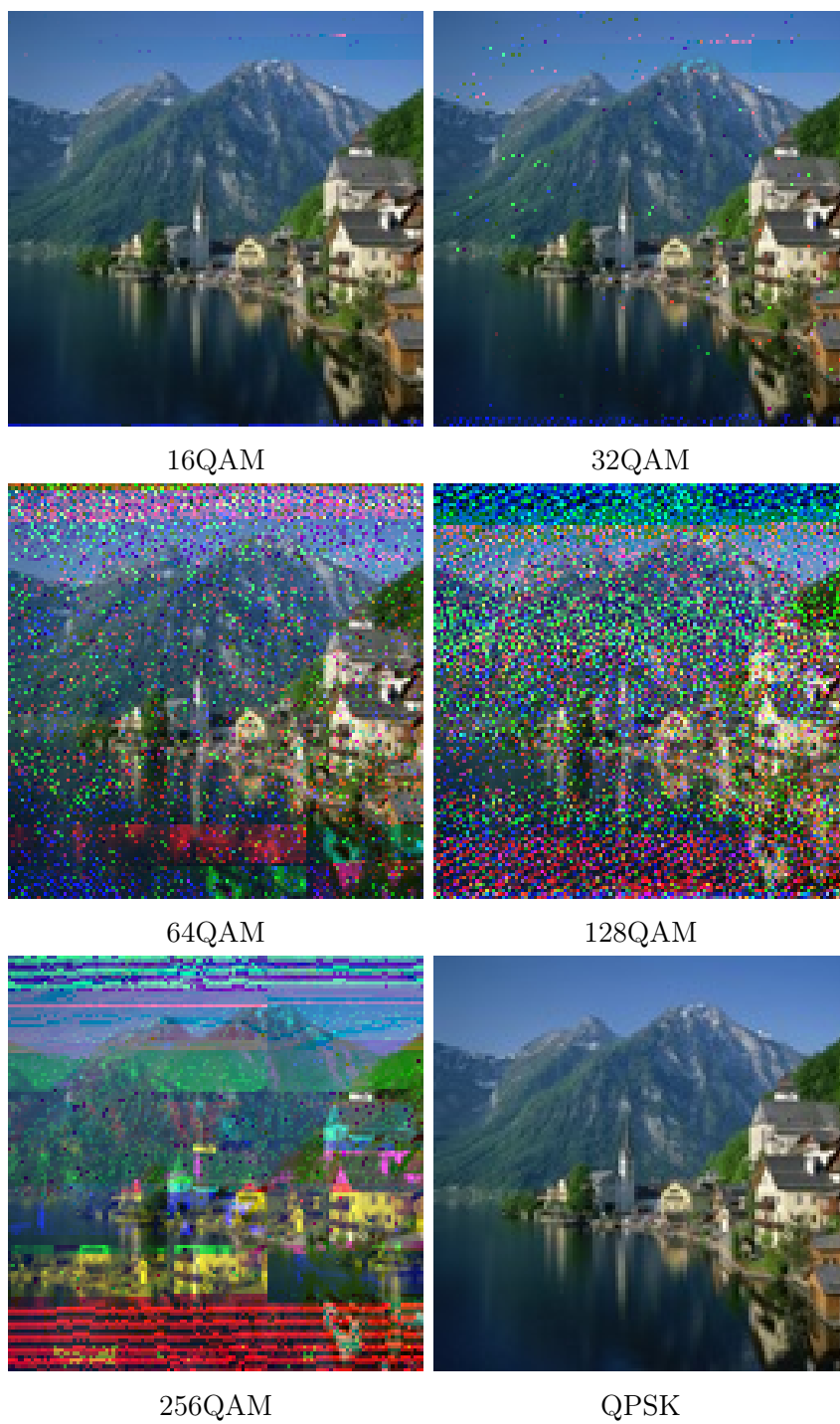


Abbildung 41: Empfangsbilder bei Variation der Modulationsart und Antennenübertragung [36]

## 5.3 Variation der Symbolrate

### Konfiguration der Messung:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m) und Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	für Kabel 0,5...6,5 MHz, für Antenne 0,5...3 MHz
Sendepiegel:	für Antenne +15 dBm, für Kabel -20 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	-20 dBm
Modulationsart:	16QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. und Trigger des Analysators:	beide extern
Aufzeichnungslänge:	2700 Symbole

Die Symbolrate wurde ab 0,5 MHz in Schritten von 0,5 MHz erhöht. Zunächst fand die Variation bei einer Kabelübertragung statt. Es zeichnete sich kein Verlauf ab. Die Werte für die Fehleranzahl und Symbolfehlerrate schwankten stark (Tabelle 3, oben). Bei Messwiederholungen unter konstanter Symbolrate traten weiterhin diese Schwankungen auf. Um Zufallsstreuungen zu eliminieren wurde bei der Antennenübertragung je Symbolrate 5 Einzelmessungen realisiert. Daraus wurden Mittelwerte berechnet, in die große Ausreißer nicht einbezogen wurden. Mittelwerte, die ignorierte Ausreißer enthalten sind mit \* gekennzeichnet (Tabelle 3, Mitte).

Aus dem Ergebnis lässt sich keine Zunahme der Symbolfehlerzahl und -rate mit ansteigender Symbolrate erkennen. Die Symbolfehlerrate der Antennenübertragung bewegt sich meist zwischen 0,02 % und 0,03 %. Alle Fehlergrößen der Modulation Accuracy (EVM bis Carrier\_Freq\_Err) vergrößern sich jedoch geringfügig mit ansteigender Symbolrate. Eine Symbolrate von 2 MHz führte durchgehend zu überdurchschnittlich hohen Fehlerzahlen bei den Symbolen. Dieses Merkmal blieb bei ständigen Messwiederholungen erhalten. Zur genaueren Untersuchung wurden daher noch Übertragungen bei 1,9 MHz und 2,1 MHz durchgeführt (Tabelle 3, unten). Bei diesen Symbolraten ergaben sich allerdings ebenfalls niedrige Fehlerzahlen.

Symbolrate (MHz)	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
0,5	13,3044	7,5024	6,9403	6,1145	-25,6230	83714	0,8516
1	13,3215	7,5117	6,9490	6,1225	-25,6192	14	0,0001
1,5	13,3627	7,5331	6,9741	6,1389	-25,6160	83715	0,8516
2	13,3727	7,5384	6,9794	6,1432	-25,6106	16	0,0002
2,5	13,3806	7,5421	6,9847	6,1460	-25,6106	83716	0,8516
3	13,3609	7,5306	6,9742	6,1362	-25,6067	17	0,0002
3,5	13,3663	7,5330	6,9787	6,1381	-25,5918	16	0,0002
4	13,3721	7,5353	6,9825	6,1399	-26,2099	83716	0,8516
4,5	13,3753	7,5374	6,9837	6,1417	-26,1901	83714	0,8516
5	13,3767	7,5376	6,9855	6,1416	-26,1839	17	0,0002
5,5	13,4169	7,5603	7,0074	6,1602	-26,1750	15267	0,1553
6	13,4186	7,5602	7,0099	6,1602	-26,1509	46777	0,4758
6,5	13,4216	7,5614	7,0115	6,1607	-26,1487	91048	0,9262

Symbolrate (MHz)	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
0,5	13,3582	7,5276	6,9747	6,1382	-52,2640	29,8	0,0003
1	13,4719	7,5831	7,0481	6,1829	-51,9956	17,8	0,0002
1,5*	13,6375	7,6641	7,1543	6,2466	-52,6991	126	0,0013
2	13,7488	7,7186	7,2250	6,2905	-52,4638	23908,2	0,2432
2,5	13,9350	7,8125	7,3403	6,3660	-52,1901	25,2	0,0003
3*	14,0162	7,8492	7,4012	6,3910	-52,3408	28	0,0003

Symbolrate (MHz)	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
1,9	13,8069	7,7382	7,2736	6,306	-56,9258	27	0,0003
2,1	13,7502	7,6954	7,2497	6,2675	-57,2325	43	0,0004

Tabelle 3: Fehlergrößen in Abhängigkeit der Symbolrate. *Oben:* Kabelübertragung. *Mitte und unten:* Antennenübertragung.

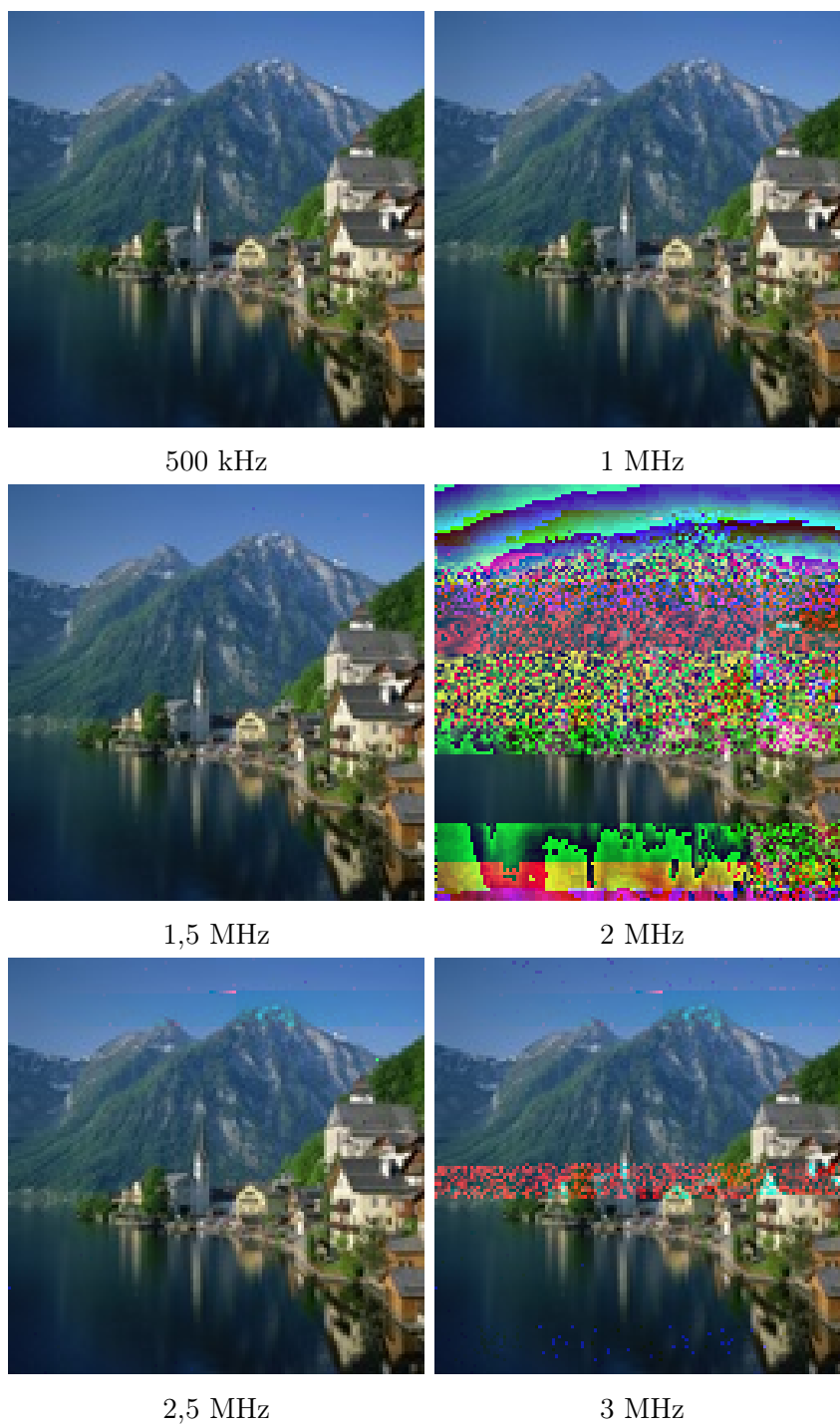


Abbildung 42: Empfangsbilder bei Variation der Symbolrate und Antennenübertragung [36]





1,9 MHz

2,1 MHz

Abbildung 43: Empfangsbilder bei Symbolraten im Abstand von 100 kHz zu 2 MHz

## 5.4 Messungen mit interner Referenzfrequenz

Bisher waren Signalgenerator und -analysator über eine Leitung für die Referenzfrequenz verbunden. Der Analysator verwendete dabei eine externe Referenzfrequenz vom Generator. In diesem Abschnitt werden Messungen aufgeführt, die die Veränderung der Frequenz über mehrere Minuten darstellen. Dazu wurde ein nichtmoduliertes Signal von 2,44 GHz vom Generator aus versandt und mit dem FSQ8 im Spektralanalyse-Modus beobachtet. Die Referenzfrequenz des Analysators wurde auf intern gestellt. Der Analysator misst die Frequenz des Empfangssignals und bezieht sich dabei auf die eigene Referenzfrequenz. Eine Abweichung von 2,44 GHz kann sowohl vom Generator als auch vom Analysator verursacht sein. Es wird somit die Differenz zwischen den internen Frequenzen beider Geräte gemessen und nicht die Abweichung von einem theoretischen Idealwert.

### Messung der Frequenzveränderung:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Sendepegel:	-20 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	-20 dBm
Modulationsart:	keine Modulation
Ref.-Freq. des Analysators:	intern
Trigger des Analysators:	extern
Messumfang:	21 Messungen im Abstand von 30 s über 10 min

Bei den warmgelaufenen Geräten hat sich über 10 min die Frequenz um ca. 3 Hz abgesenkt. Ab 7,5 min verbleibt der Wert bei ca. -2 Hz. Trotz der geringen Abweichung kommt es bei Bildübertragungen zu durchgängigen Symbolfehlerraten  $> 50\%$ . Während der Übertragung kommt es zwischen den Sendeabschnitten immer wieder zu Quadrantenrotationen. Die Initialfolge, die zu Erkennung der Quadrantenlage einmalig am Anfang übertragen wurde, ist nur so lange gültig, wie die Quadrantenlage beibehalten bleibt. Im Software-Teil wurde beschrieben, wie eine Abschnittsweise Korrektur mit 4 Symbolen erfolgen kann. Mit dieser Implementierung wurde eine Grafik übertragen und im Folgenden dargestellt.

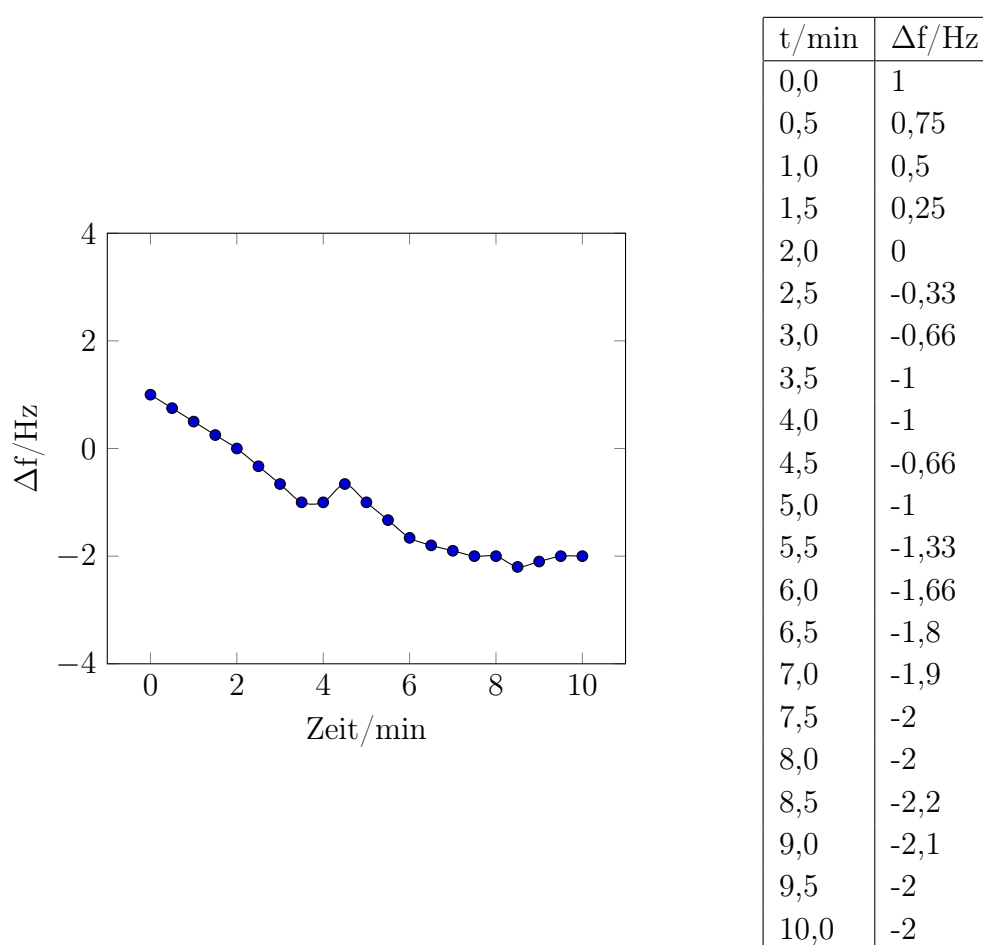


Abbildung 44: Frequenzveränderung über einen Zeitraum von 10 min bei einer Centerfrequenz von 2,44 GHz

## Bildübertragung ohne Referenzfrequenz-Leitung und abschnittweiser 4-Symbol-

### Korrektur:

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (4m Abstand)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Sendepiegel:	10 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. des Analysators:	intern
Trigger des Analysators:	extern
Aufzeichnungslänge:	2704 Symbole



Abbildung 45: Empfangsbild bei einer Übertragung ohne Referenzfrequenz-Leitung und abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate	Wechsel (Quadrantenrotationen)
14,4956	8,0237	7,7168	6,5207	-62,6980	7520	0,0382	71

Tabelle 4: Fehlergrößen bei einer Übertragung ohne Referenzfrequenz-Leitung und abschnittweiser 4-Symbol-Korrektur

Mit einer abschnittweisen 4-Symbol-Korrektur konnte unter der Verwendung einer internen Referenzfrequenz die Symbolfehlerrate von mehr als 50% auf 3,8% reduziert werden. Bei der Übertragung von 73 Abschnitten fand 71 mal eine Quadrantenrotation statt. Somit also fast nach jedem Abschnitt. Dies unterstreicht den Nutzen einer abschnittweisen Korrektur.

## 5.5 Übertragung von Einzelpunkten

Die voreingestellten Symbolmappings des Analyzers führen beim Durchlaufen einer aufsteigenden Wertefolge zu spitzwinkligen Trajektorien. Bei einer Datenübertragung kann keine bestimmte Symbolreihenfolge eingehalten werden. Dennoch soll in diesem Abschnitt überprüft werden, ob die Trajektorienform Auswirkungen auf die Qualität des Empfangssignal hat. Als zweites soll überprüft werden, welche Folgen kontinuierliche Symbolwiederholungen haben.

### 5.5.1 Überprüfung des Einflusses der Trajektorienform

Für eine vollständige Rekonstruktion von Symbolfolgen ist eine Rotationskorrektur notwendig. Vor dieser Korrektur muss zumindest die relative Lage im Konstellationsdiagramm bekannt sein. Diese relative Trajektorienlage wird nicht in allen Fällen durch den Analyzer richtig erkannt. Eine korrekte Erkennung ist gegeben, wenn alle Konstellationspunkte nacheinander durchlaufen werden. In dieser Messung wird keine Initialfolge vorangestellt. Bei einer geringen Anzahl unterschiedlicher Symbole ist keine eindeutige Rekonstruktion möglich. Bei ausschließlich gleichen Symbolen erscheint im Analyzer-Display ein Rauschen. Ab 2 unterschiedlichen Symbolen werden mehrere Trajektorien angezeigt, zwischen denen ständig gewechselt wird. Das Empfangssignal ist mehrdeutig. Es lassen sich daraus unterschiedliche Trajektorien ableiten. Mit fortwährender Erhöhung der Anzahl verschiedener Symbole verringert sich der Umfang an Interpretationsmöglichkeiten.

Es wurden Demodulationsergebnisse bei der Übertragung von 4 Symbolen überprüft. Dabei wurden zwei Trajektorienformen erzeugt. Bei 16QAM wurden hierfür 4 Symbole innerhalb eines Quadranten übertragen. Aus der Symbolfolge 0123 resultiert eine spitzwinklige Trajektorie. Diese kann auch als Z-förmig oder 8-förmig bezeichnet werden. Die Symbolfolge 0132 führt generatorseitig zu einer kreisförmigen Trajektorie.

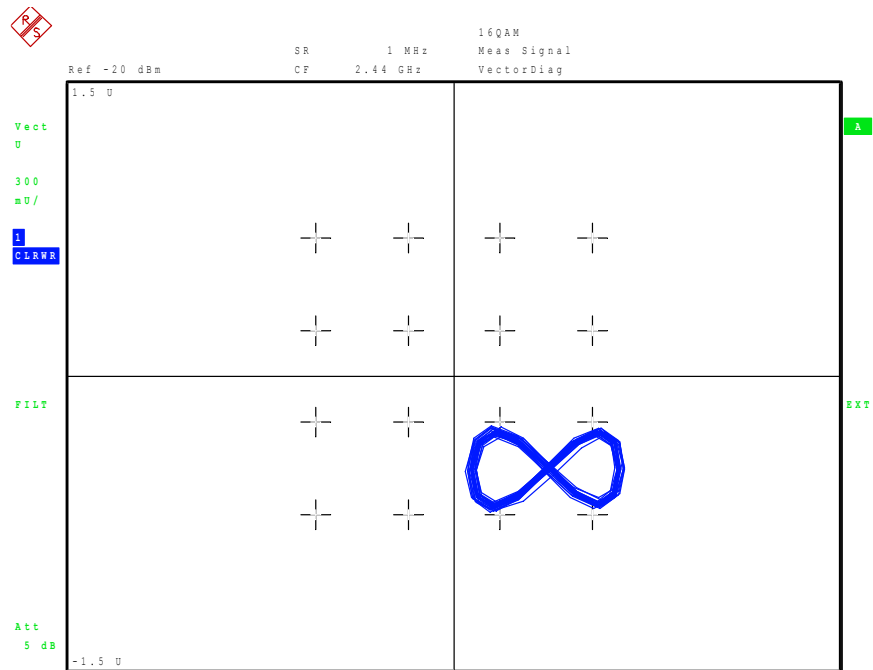


Abbildung 46: Empfangene 8-förmige Trajektorie bei der Symbolfolge 0123.

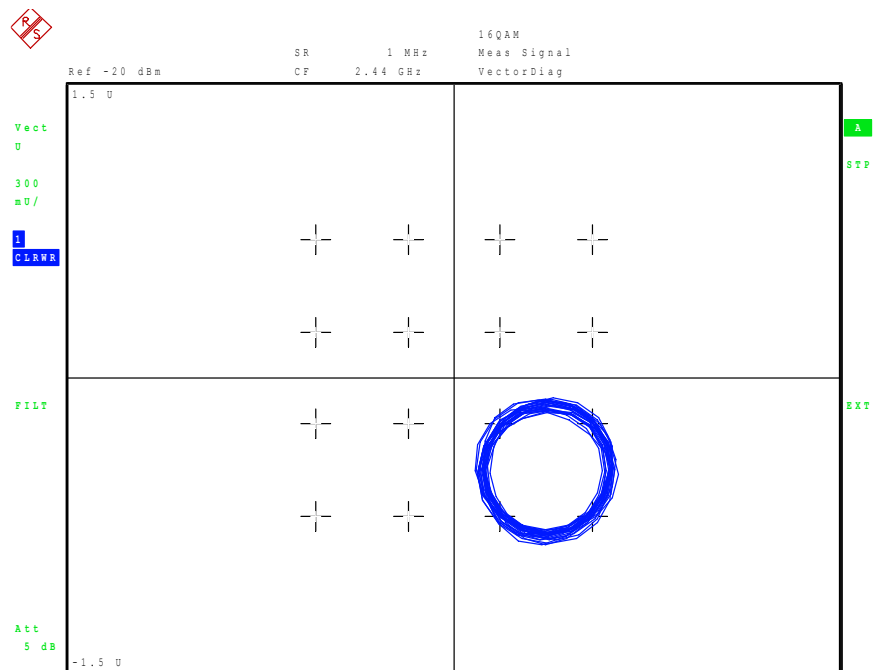


Abbildung 47: Empfangene kreisförmige Trajektorie bei der Symbolfolge 0132. Korrekte Rekonstruktion.

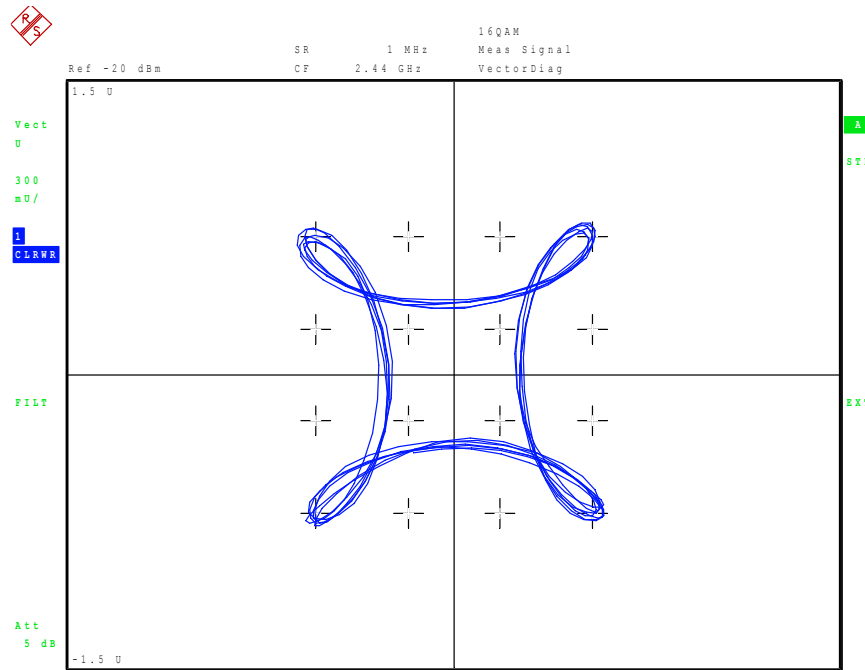


Abbildung 48: Fehlerhafte Rekonstruktion einer Trajektorie zur Symbolfolge 0132.

Bei der Übertragung der Symbolfolge 0123 wurde immer eine korrekte Trajektorie empfangen (Abbildung 46). Der angezeigte Verlauf wechselte zeitweise den Quadranten. Dies kann jedoch mit einer Rotationskorrektur ausgeglichen werden. Bei der Übertragung einer kreisförmigen Trajektorie der Folge 0132, wechselte der Analyzer fortwährend zwischen einer richtigen und einer falschen Auswertung. Die unkorrekte Rekonstruktion in Abbildung 48 beinhaltet nicht nur einen Rotationsfehler und kann somit nicht auf herkömmlichem Weg korrigiert werden. Zeitweise wurde die korrekte Trajektorie angezeigt (Abbildung 47).

Aus den Übertragungen von Einzelsymbolen hat sich ergeben, dass spitzwinklige Trajektorien besser rekonstruiert werden können. Das Mapping ist so angeordnet, dass das Durchlaufen einer aufsteigende Wertfolge am Anfang zu einer spitzwinkligen Trajektorie führt.

### 5.5.2 Beurteilung der Übertragungsqualität bei Symbolwiederholungen

In dieser Messung ist den Nutzdaten eine vollständige Initialfolge vorangestellt. Das Erkennen der relativen Trajektorienlage ist damit sichergestellt. Mithilfe der empfangenen Initialfolge kann auch eine Rotationskorrektur stattfinden; somit ist eine komplette Rekonstruktion der Symbole möglich. Die Übertragung wird mit 16QAM und Kabel durchgeführt. Die Centerfrequenz beträgt 2,44 GHz, die Symbolrate 1 MHz. Die Sendeleistung ist auf -20 dBm eingestellt. Andere Störeinflüsse sind minimal gehalten, sodass auf den Einfluss der Symbolwiederholung rückgeschlossen werden kann. Es soll überprüft werden, wie sich Symbolwiederholungen nach der Initialfolge auswirken und welche Relevanz dabei der Wiederholungsumfang hat. Bei der Übertragung unkomprimierter Bilder mit einfarbigen Flächen kann es zu solchen Wiederholungen kommen. Die Empfangstrajektorie zeigt dabei einen schleifenförmigen Verlauf, der von dem entsprechenden Konstellationspunkt ausgeht. Ragt die Trajektorien-Schleife in einen benachbarten Entscheidungsbereich und wird zum falschen Zeitpunkt ausgewertet, so entsteht ein Symbolfehler.

In Tabelle 5 ist zu sehen, dass ab einer Anzahl von 15 Wiederholungen, Symbolfehler eintreten. Für die Berechnung der Symbolfehlerrate wurde die Fehleranzahl durch die Länge der Nutzdaten dividiert, was in diesem Fall der Wiederholungszahl entspricht. Die Länge der Initialfolge wurde dabei nicht berücksichtigt, da die Fehleranzahl ebenfalls nur anhand der Nutzdaten berechnet wurde. Aufgrund des geringen Übertragungsumfangs führen Streuungen der Symbolfehleranzahl zu großen Varianzen in der Symbolfehlerrate. Zum Erhalt repräsentativer Ergebnisse wurden daher immer 5 Einzelmessungen angefertigt und daraus der Mittelwert berechnet. Bis 14 Wiederholungen entstand kein Symbolfehler. Von 15 bis 40 Wiederholungen ist mit Ausnahmen ein stetiger Anstieg der Symbolfehlerrate festzustellen. Bei 40 Wiederholungen ist ein inakzeptables Maß erreicht, da in der Praxis noch andere Störfaktoren hinzuwirken. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den anderen Faktoren, die in diesem Kapitel variiert wurden, die Symbolwiederholung einen signifikanten Einfluss hat.

Anzahl an Symbolwiederholungen	Fehleranzahl (Mittelwert über 5 Einzelmessungen)	Symbolfehlerrate (Mittelwert über 5 Einzelmessungen)
1 bis 14	0	0,0000
15	0,2	0,0133
16	1	0,0625
17	1,2	0,0706
18	2,4	0,1333
19	2,8	0,1474
20	3,4	0,1700
21	4,2	0,2000
22	5,4	0,2455
23	6	0,2609
24	6,4	0,2667
25	7,2	0,2880
26	7	0,2692
27	7,2	0,2667
28	8,4	0,3000
29	9,8	0,3379
30	9,4	0,3133
31	10	0,3226
32	11	0,3438
33	11,2	0,3394
34	11,8	0,3471
35	12	0,3429
36	11,6	0,3222
37	12,8	0,3459
38	13,6	0,3579
39	13	0,3333
40	14,6	0,3650

Tabelle 5: Symbolfehleranzahl und -rate in Abhängigkeit des Umfangs an Symbolwiederholungen



## 6 Optimierung der Signalkonstellation

### 6.1 Beschreibung des Grundproblems

In der drahtlosen Signalübertragung besteht das Rauschen u.a. aus unspezifischen elektromagnetischen Wellen, die sich in ihren Frequenzen über die gesamte betrachtete Bandbreite verteilen. Hinzu kommt das Eigenrauschen des Analyzers. Eine häufig angegebene Größe ist dabei das Signal-Rausch-Verhältnis SNR (engl. signal-to-noise ratio, Gleichung 8). Für  $\text{SNR} > 0\text{dB}$  ist die Signalleistung größer als die Rauschleistung. In diesem Fall kann das Vorhandensein eines Signals zumindest festgestellt werden. Für eine korrekte Demodulation und Decodierung des Empfangssignals ist ein größerer Rauschabstand nötig.

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) \quad (8)$$

$P_S$  : Signalleistung

$P_N$  : Rauschleistung

Die Spannungsamplitude des empfangenen Signals ist zur Signalleistung proportional. Sie entspricht im Konstellationsdiagramm dem Abstand eines empfangenen Signalpunktes zum Koordinatenursprung. Bei höherer Signalleistung hat das Ausbreitungsfeld der Empfangspunkte eine größere Ausdehnung um den Ursprung. Umgekehrt verhält es sich bei geringer Leistung. Der Analyzer nimmt hierfür eine automatische Skalierung vor, wozu jedoch eine Mindestleistung erforderlich ist. Nach dieser Korrektur werden Rauschbereiche aus Empfangspunkten um die Idealpunkte im Konstellationsdiagramm angezeigt. Der Radius dieser Bereiche nimmt mit Abschwächung der Leistung zu. Das Rauschen muss stark genug ausgeprägt sein um sichtbar zu werden. Zudem muss eine ausreichend große Aufzeichnungslänge eingestellt werden, um das Rauschen erkennbar zu machen. Das Rauschen gehorcht einer Normalverteilung, wobei der Erwartungswert dem Mittelpunkt eines Rauschbereichs entspricht. Die Standardabweichung steht in Zusammenhang mit der Rauschleistung. Um die Konstellationspunkte sind nicht-sichtbare Entscheidungsbereiche angelegt. Um aus dem Empfangssignal eine Symbolfolge zu generieren, wird derjenige Konstellationspunkt gewertet, dessen Euklidischer Abstand zum Empfangspunkt am kleinsten ist. Ein Symbolfehler tritt auf, wenn durch starkes Rauschen ein Empfangspunkt in einen angrenzenden Entscheidungsbereich gelangt. Das bedeutet, er liegt näher einem benachbarten Konstellationspunkt als dem vorgesehenen. Die Aufgabe besteht darin, die Konstellationspunkte innerhalb eines beschränkten Leistungskreises so anzuordnen, dass die Symbolfehlerwahrscheinlichkeit minimal wird. Anders ausgedrückt heißt das, dass der Punktabstand maximiert werden soll, ohne das ganze Feld zu vergrößern.

## 6.2 Herleitung der Fehlerwahrscheinlichkeit

Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens, um die oben genannte Problemstellung zu lösen, stammt von Foschini, Gitlin und Weinstein [21]. Für diese Arbeit soll eine anwendungsorientierte Beschreibung erfolgen, in der die Grundschrirte des Vorgehens skizziert werden. Da das Rauschen normalverteilt ist, lässt es sich durch folgenden bedingten Wahrscheinlichkeitsausdruck formulieren:

$$\Pr(z \notin R_n | s_n) = \int_{z \notin R_n} \frac{1}{2\pi N_0} \exp\left[-\frac{\|z - s_n\|^2}{2N_0}\right] dz \quad (9)$$

$\Pr$  (engl. probability) gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass ein verrauschter Empfangspunkt  $z$  sich nicht im korrekten Entscheidungsbereich  $R_n$  befindet, unter der Bedingung, dass  $s_n$  der ideale Konstellationspunkt ist.  $2N_0$  ist dabei die Rauschleistung. Die Fehlerwahrscheinlichkeit  $P_e$  (e entspr. engl. error) errechnet sich über den Wahrscheinlichkeitsmittelwert aller fehlerhaften Empfangspunkte:

$$P_e = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Pr(z \notin R_n | s_n) \quad (10)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $\Pr$ , dass ein verrauschter Empfangspunkt  $z$  sich in einem angrenzenden Entscheidungsbereich  $R_i$  befindet, wird durch folgenden Ausdruck beschrieben:

$$\Pr(z \in R_i | s_n) \sim \frac{\sqrt{2}}{\|s_i - s_n\|} \sqrt{\frac{N_0}{\pi}} \exp\left[-\frac{\|s_i - s_n\|^2}{8N_0}\right] \quad (11)$$

Alle angrenzenden Entscheidungsbereiche sind gleichgroß und punktsymmetrisch um  $R_n$  angeordnet. Somit lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass  $z$  in einem der angrenzenden Bereiche liegt, berechnen, indem die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Nachbarbereiche aufsummiert werden. Dies ist gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit, dass  $z$  nicht im korrekten Entscheidungsbereich  $R_n$  enthalten ist.

$$\Pr(z \notin R_n | s_n) = \sum_i \Pr(z \in R_i | s_n) \quad (12)$$

Für  $\Pr(z \in R_i | s_n)$  in Gleichung (12) wird der Ausdruck (11) eingesetzt. Die Gleichung (12) wird wiederum in Gleichung (10) für  $\Pr(z \notin R_n | s_n)$  eingesetzt. Daraus resultiert der endgültige Ausdruck für die Fehlerwahrscheinlichkeit  $P_e$ :

$$P_e \sim \frac{1}{N} \sqrt{\frac{N_0}{\pi}} \sum_n \sum_{i \neq n} \frac{\sqrt{2}}{\|s_i - s_n\|} \exp\left[-\frac{\|s_i - s_n\|^2}{8N_0}\right] \quad (13)$$

Ziel ist es nun, eine derartige Positionierung aller Konstellationspunkte  $\{s_n\}_{n=1}^N$  zu finden, das der Ausdruck (13) minimal wird.

### 6.3 Numerische Lösung des Ausdrucks der Fehlerwahrscheinlichkeit

Da sich eine analytische Lösung des Ausdrucks (13) schwierig gestaltet, ist eine numerische Lösungsmethode vorzuziehen. Hierfür soll das Gradientenabstiegsverfahren angewandt werden. Es ist ein Verfahren zur Auffindung eines Minimums, insbesondere bei mehrdimensionalen Funktionen. Hierfür werden alle Konstellationspunkte in dem Vektor  $S_m$  zusammengefasst, wobei  $m$  den Iterationsschritt angibt:

$$S = \begin{pmatrix} S_1^{(m)} \\ S_2^{(m)} \\ \vdots \\ S_n^{(m)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Der Standard-Algorithmus beim Gradientenabstiegsverfahren lautet damit wie folgt:

$$S_{m+1} = S_m - \alpha_m \nabla P_e(S_m) \quad (15)$$

$\alpha_m$  ist dabei die Schrittweite und  $\nabla P_e(S_m)$  der Gradient der Fehlerwahrscheinlichkeit  $P_e$  der Konstellation  $S_m$ . Ein Gradient fasst die partiellen Ableitungen an einer bestimmten Stelle zusammen:

$$\nabla P_e(S_{m,x}, S_{m,y}) = \left( \frac{\partial P_e}{\partial S_{m,x}}(S_{m,x}, S_{m,y}), \frac{\partial P_e}{\partial S_{m,y}}(S_{m,x}, S_{m,y}) \right) \quad (16)$$

Gleichung 16 gibt zu einem Konstellationspunkt  $S_m$  mit den Koordinaten  $S_{m,x}$  und  $S_{m,y}$  die Steigung in X-Richtung (I) und die Steigung in Y-Richtung (Q) an. In Gleichung 15 zeigt der Gradient in die Richtung des steilsten Abstiegs. In diese Richtung wird gegangen, um ein Minimum zu finden [35].

Wie eingangs dieses Kapitels erwähnt, ist eine unbegrenzte Vergrößerung der Punktabstände nicht zielführend. Die Sendeleistung würde dabei uneingeschränkt ansteigen. Dies ist beim Standard-Algorithmus des Gradientenabstiegsverfahrens (Gleichung 15) der Fall. Deshalb soll ein Gradientenverfahren mit Leistungsbeschränkung angewandt werden. Im Folgenden ist der Algorithmus noch einmal ohne Beschränkung für  $S_{m+1}^*$  angeführt:

$$S_{m+1}^* = S_m - \alpha_m \nabla P_e(S_m) \quad (17)$$

Für die Leistungsbeschränkung wird der unbeschränkte Algorithmus (17) als Einheitsvektor normiert:

$$S_{m+1} = \frac{S_{m+1}^*}{\|S_{m+1}^*\|} \quad (18)$$

## 6.4 Geometrische Interpretation der Lösung

Foschini, Gitlin und Weinstein [21] kommen zu dem Ergebnis, dass in einer optimierten Konstellation die Einheitsvektorsumme  $\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i}$  benachbarter Punkte kollinear zum Signalvektor  $s_k$  ist:

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i} \sim \vec{s}_k \quad (19)$$

Dieser Sachverhalt soll im Folgenden an einem Beispiel erläutert werden. Zufälligerweise ist die Standardkonstellation bei QPSK übereinstimmend mit der Symbolfehleroptimierten (Abbildung 49). Der Vektor  $1_{s_k - s_i}$  ist ein Einheitsvektor, der von einem benachbarten Punkt  $s_i$  auf den betrachteten Punkt  $s_k$  zeigt. Zu diesem wird ein weiterer Vektor  $1_{s_k - s_i}$  von einem anderen Nachbarpunkt ausgehend addiert. Der Summenvektor soll nun kollinear mit  $\vec{s}_k$  sein. Das bedeutet, dass der Summenvektor auf dem Signalvektor  $\vec{s}_k$  oder seiner Verlängerung liegen muss. Der Signalvektor verläuft vom Koordinatenursprung zum Punkt  $s_k$ .

Berechnung des Summenvektors für QPSK (Abbildung 49):

$$s_k = (1; 1), s_1 = (-1; 1), s_2 = (1; -1)$$

$$s_k - s_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$s_k - s_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$1_{s_k - s_1} = \frac{s_k - s_1}{\|s_k - s_1\|} = \frac{s_k - s_1}{2} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$1_{s_k - s_2} = \frac{s_k - s_2}{\|s_k - s_2\|} = \frac{s_k - s_2}{2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i} = 1_{s_k - s_1} + 1_{s_k - s_2} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i} \sim \vec{s}_k = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

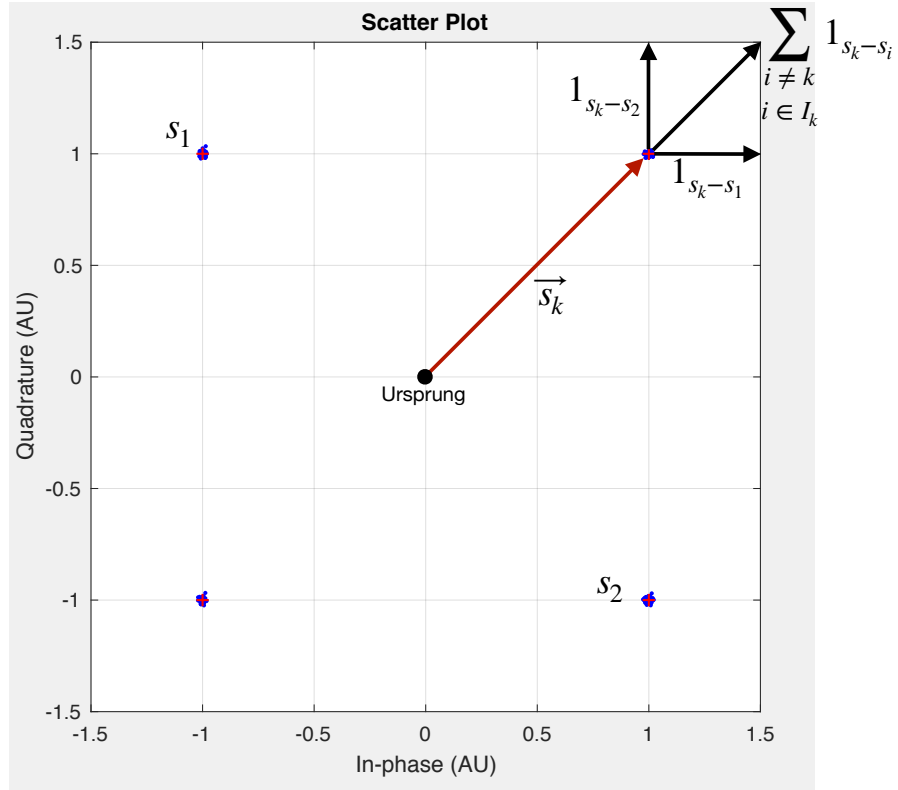


Abbildung 49: Das Standard-Mapping “Natural“ von QPSK entspricht dem Optimum. Der Summenvektor ist kollinear zum Signalvektor (rot). Die Einheitsvektoren sind nicht maßstabsgetreu dargestellt.

Aus der Standardkonstellation von 16QAM resultiert nicht die geringste Symbolfehlerwahrscheinlichkeit (Abbildung 50). Die Einheitsvektoren  $1_{s_k-s_1}$ ,  $1_{s_k-s_2}$  und  $1_{s_k-s_3}$  zwischen dem betrachteten Punkt  $s_k$  und den nächstgelegenen Nachbarpunkten  $s_1, s_2, s_3$  summieren sich zu einem Vektor in x-Richtung. Da sich die beiden Vektoren  $1_{s_k-s_1}$  und  $1_{s_k-s_2}$  ausgleichen, entspricht der Summenvektor  $1_{s_k-s_3}$ . Der Summenvektor ist nicht kollinear und auch nicht parallel zum Signalvektor  $s_k$ . Dementsprechend handelt es sich bei der Standardkonstellation nicht um das Optimum.

Berechnung des Summenvektors für 16QAM (Abbildung 50):

$$s_k = (3; 1), s_1 = (3; 3), s_2 = (3; -1), s_3 = (1; 1)$$

$$s_k - s_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$s_k - s_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$s_k - s_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$1_{s_k - s_1} = \frac{s_k - s_1}{\|s_k - s_1\|} = \frac{s_k - s_1}{2} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$1_{s_k - s_2} = \frac{s_k - s_2}{\|s_k - s_2\|} = \frac{s_k - s_2}{2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$1_{s_k - s_3} = \frac{s_k - s_3}{\|s_k - s_3\|} = \frac{s_k - s_3}{2} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i} = 1_{s_k - s_1} + 1_{s_k - s_2} + 1_{s_k - s_3} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i \in I_k}} 1_{s_k - s_i} \sim \vec{s}_k = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} \nparallel \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



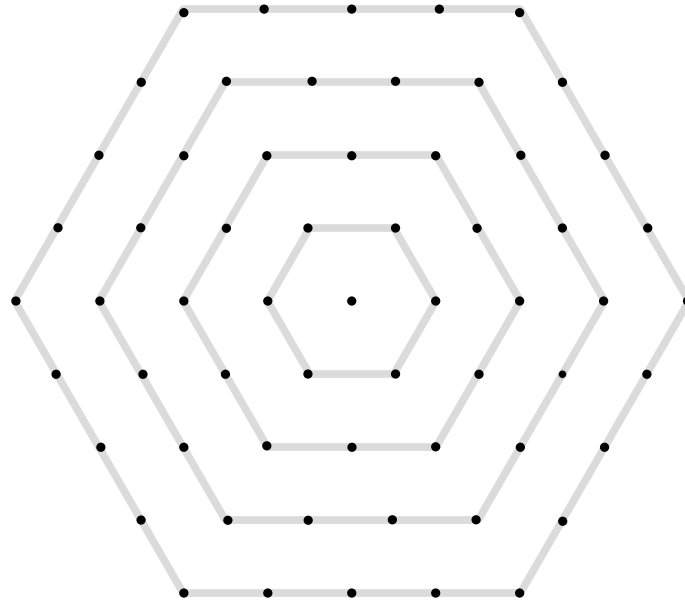


Abbildung 51: Punktsymmetrische Konstellationsstruktur in Sechseck-Anordnung

## 6.5 Erzeugung benutzerdefinierter Signalkonstellationen

Die vorgestellten optimierten Signalkonstellationen sollen nachkonstruiert werden. Mit ihnen sollen Testmessungen erfolgen, um ein Vergleich mit den in der Quelle veröffentlichten Ergebnissen zu ermöglichen. Dafür müssen die Konstellationen im Generator und im Analysator implementiert werden. Es liegen die Punktkoordinaten der optimierten Konstellationen vor. An beide Generatoren werden im Arbitrary Mode von MATLAB aus Koordinaten versandt. In MATLAB können somit die optimierten Koordinaten eingegeben werden. Dazu wurden neue Varianten der Funktion `Senden` programmiert (Abbildung 54). Die Symbole im Vektor `IN_data` werden in Punktkoordinaten umgewandelt und in `QAM_data` gespeichert. Die individuellen Konstellationsdaten werden im Vektor `User_Mapping...` angegeben.

Für den Analysator R&S FSQ8 können benutzerdefinierte Konstellationen mit dem Software-Tool `mapwiz` festgelegt werden. Dieses Tool speichert die Konstellationen als VAM-Dateien ab, die vom Analysator importiert werden. Es können damit nur Konstellationsgrade einer Zweierpotenz erzeugt werden. Die vorgeschlagenen optimierten Konstellationen mit 7 und 19 Punkten lassen sich deshalb nicht realisieren.



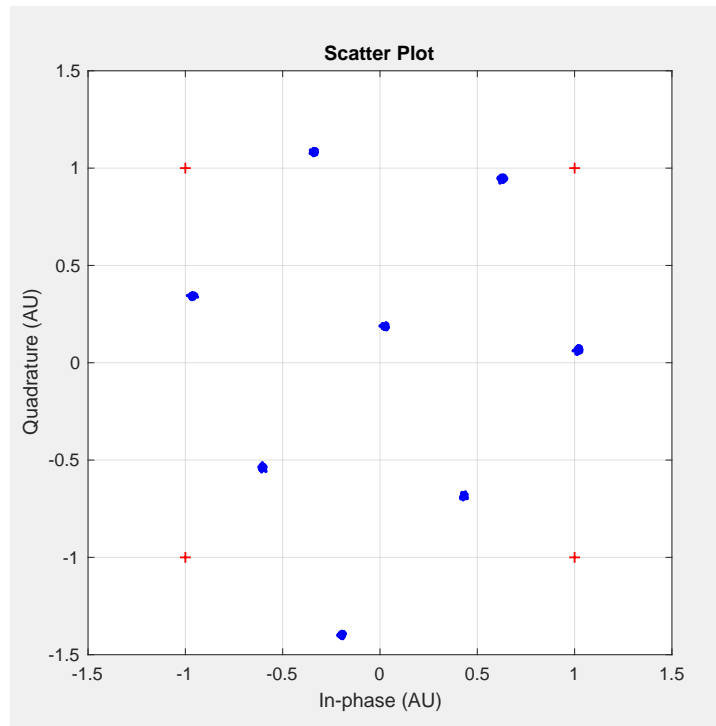


Abbildung 52: Optimierte Konstellation von 8PSK.

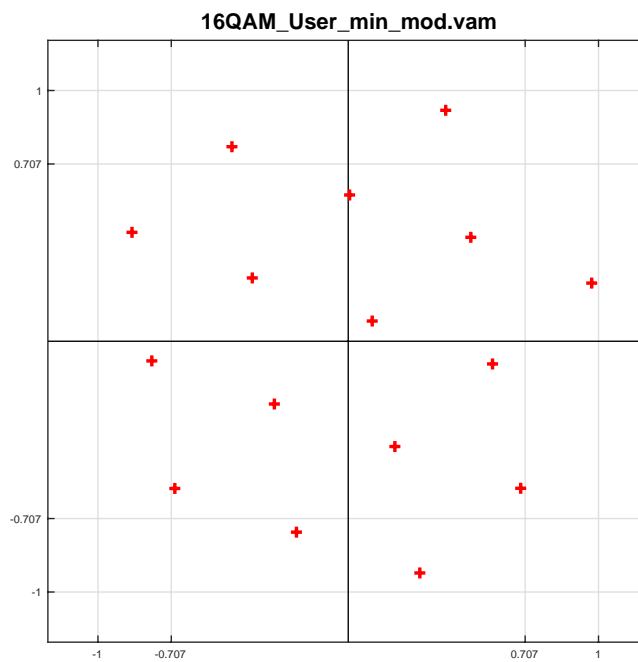


Abbildung 53: Optimierte Konstellation von 16QAM

```

41 %Modulation Anfang:-----
42
43 User_Mapping8min=[0.628+0.946i,-0.339+1.082i,1.020+0.065i,-0.197-1.400i,-0.962+0.344i,0.026+0.18
44
45 for Index=1:length(IN_data)
46     OAM_data(Index)=User_Mapping8min(IN_data(Index)+1);
47 end
48
49 %Modulation ENDE-----

```

Abbildung 54: Programmausschnitt zur generatorseitigen Erzeugung benutzerdefinierter Konstellationen

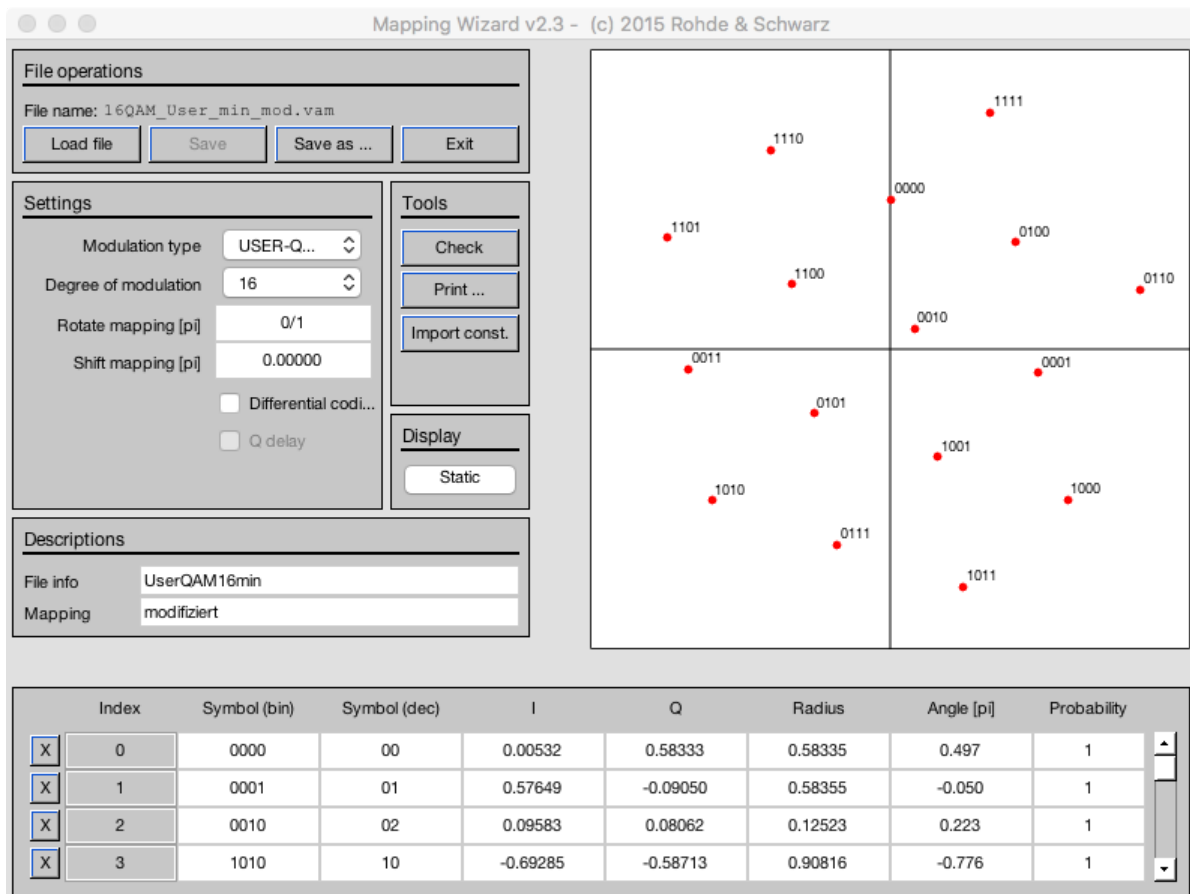


Abbildung 55: Software-Tool mapwiz zur Erzeugung benutzerdefinierter Konstellationen für den Analysator R&S FSQ8

## 6.6 Vergleichsmessung von 8-Punkt-Konstellationen mit dem Signalgenerator Agilent EXG N5172B

In diesem Abschnitt wird auf die Antennenübertragung eines Testbilds eingegangen, die mit der 8PSK Standardkonstellation und der optimierten 8-Punkt-Konstellation ausgeführt wurde. Aus statistischen Gründen wurde jede Übertragung 5 mal realisiert. In jedem Durchlauf der Sendeschleife pausiert das Programm für 0,5 s. Der Sendepegel wurde relativ niedrig eingestellt um durch einen geringen Rauschabstand größere Qualitätsunterschiede hervorzurufen.

### Antennenübertragung einer Grafik im MATLAB-Bilddatenformat:

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepegel:	-2,5 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	8PSK und User-QAM8 (optimiert)

In Tabelle 6 ist zu sehen, dass bei der optimierten 8-Punkt-Konstellation Symbolfehleranzahl und -rate niedriger ausgefallen sind als bei 8PSK (Standard). Dies entspricht der Zielsetzung. Bei den übrigen Fehlergrößen konnte sich die optimierte Konstellation nicht eindeutig abheben. Beim Betragsfehler (Magnitude\_Err) und Frequenzoffset (Carrier\_Freq\_Err) konnten bessere Werte erreicht werden. Der Phasenfehler fiel dagegen höher aus.

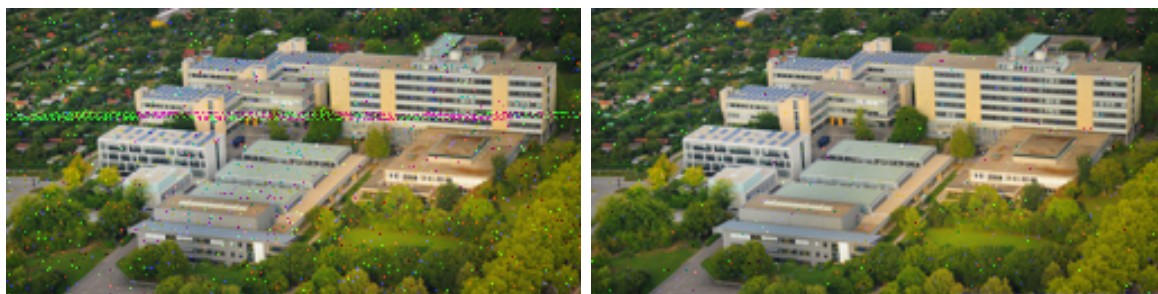


Abbildung 56: Es wurden die Übertragungsbilder mit dem Median der Fehleranzahl ausgewählt. *Links:* 8PSK (6697 Fehler). *Rechts:* Optimierte 8-Punkt-Konstellation (1480 Fehler).

### 8PSK:

Einzel-messung	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
1	21,1896	14,9959	8,8308	11,9963	-71,9645	3302	0,0126
2	21,4585	15,2516	8,9184	12,1909	-72,2705	6361	0,0243
3	21,8487	15,6214	9,0419	12,4774	-72,6708	9426	0,0360
4	21,5357	15,3694	8,9175	12,2824	-72,4114	14977	0,0571
5	21,8266	15,5970	9,0319	12,4713	-72,5934	6697	0,0255
Mittelwerte:	21,5718	15,3670	8,9481	12,2836	-72,3821	8153	0,0311

### User-QAM 8 (optimiert):

Einzel-messung	EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
1	20,3977	10,0194	21,6496	7,9751	-71,6828	713	0,0027
2	22,1803	10,9564	22,8582	8,7323	-72,9655	1635	0,0062
3	21,9145	10,7743	22,5182	8,6016	-72,7290	1480	0,0056
4	21,4372	10,5948	22,0752	8,4545	-72,4430	1168	0,0045
5	21,8884	10,7998	22,5459	8,5998	-72,7733	1545	0,0059
Mittelwerte:	21,5636	10,6290	22,3294	8,4726	-72,5187	1308	0,0050

Tabelle 6: Fehlerauswertung einer Vergleichsmessung mit 8PSK (oben) und optimiertem User-QAM8 (unten)

## 6.7 Modulation bekannter 8-Punkt-Konstellationen mit dem Signalgenerator R&S SMJ100A

Foschini et al. [21] stellen eine Reihe bekannter Konstellationen mit 8 Punkten vor, deren Signalqualität bewertet wird. Für die Konstellationen "Rechteckig", "4-4", "1-7" und "Dreieckig" wurden bei verschiedenen Rauschabständen die Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet. Diese Ergebnisse wurden der optimierten Signalkonstellation gegenübergestellt. In dieser Arbeit wurden die veröffentlichten Auswertungen nachvollzogen. Sowohl die optimierte Konstellation, als auch die bekannten anderen Konstellationen wurden nachkonstruiert. Hinzugenommen wurde noch die 8PSK Standardkonstellation. Mit diesen 6 Konstellationen erfolgten Antennenübertragungen eines Testbilds sowie Fehlerauswertungen.

### Antennenübertragung einer Grafik im MATLAB-Bilddatenformat:

Signalgenerator: R&S SMJ100A  
Signalanalysator: R&S FSQ8  
Übertragungsmedium: Antenne (Abstand 4 m)  
Centerfrequenz: 2,44 GHz  
Symbolrate: 1 MHz  
Sendepegel: -8 dBm  
Ref.-Pegel des Analysator: automatisch  
Modulationsarten: 6 verschiedene 8-Punkt-Konstellationen

Konstellation	EVM in (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err in (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl aufsteigend	Symbolfehlerrate aufsteigend
Dreieckig	21,7034	11,8864	12,7650	9,4806	-73,9100	1475	0,0056
Optimierte Konstellation	23,6294	11,7530	23,3653	9,3793	-74,8900	3598	0,0137
4-4	23,6498	12,8812	12,7267	10,2927	-74,8707	8590	0,0328
Rechteckig	22,8521	13,8662	10,2115	11,0901	-74,6109	9974	0,0380
8PSK	22,8413	16,5589	9,3327	13,2141	-74,4554	115467	0,4405
1-7	24,2419	17,0360	36,1722	14,3034	-55,9307	226872	0,8654

Tabelle 7: Fehlertabelle der 8-Punkt-Konstellationen. Die Konstellationen sind nach Symbolfehleranzahl bzw. -rate geordnet. Der niedrigste Wert steht oben. Die optimierte Konstellation ist grün markiert. Bei der Konstellation 1-7 (grau) konnte die Initialfolge nicht richtig übertragen werden, weshalb keine Rotationskorrektur stattfand.

Mit der optimierten 8-Punkt-Konstellation konnte das zweitbeste Übertragungsergebnis erzielt werden. Das beste wurde mit der Konstellation “Dreieck“ erreicht. Zu berücksichtigen ist, dass der Analyzer bei bestimmten benutzerdefinierten Konstellationen eine längere Verarbeitungszeit hat. Wird dieser Umstand nicht beachtet, so ergeben sich Datenfehler, die nicht auf die Übertragungsgüte zurückzuführen sind. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist bei den vorinstallierten Standardkonstellationen am höchsten. Bei individuellen Konstellationen hängt sie von den Werten der Koordinaten ab. Es wurde in jeden Durchlauf der Sendeschleife eine Pause von 0,5 s eingebaut. Der Zeitvorteil bei 8PSK hat sich in der Fehleranzahl nicht bemerkbar gemacht. Hier überwiegt der negative Einfluss der Modulationsart. Da es sich bei 8PSK um eine reine Phasenumtastung handelt, ist diese Konstellation stör anfällig. Mit Ausnahme von “1-7“ konnten bei allen Konstellationen bessere Ergebnisse erreicht werden als bei 8PSK. Bei den anderen Konstellationen wird auch die Amplitudenlage für die Modulation verwendet. Bei “1-7“ konnte die Initialfolge nicht korrekt übertragen werden, was ein Merkmal einer hohen

Fehlerrate ist. Die Rotationskorrektur wurde daher nicht ausgeführt. Als Ursache wird der Konstellationspunkt im Koordinatenursprung vermutet.

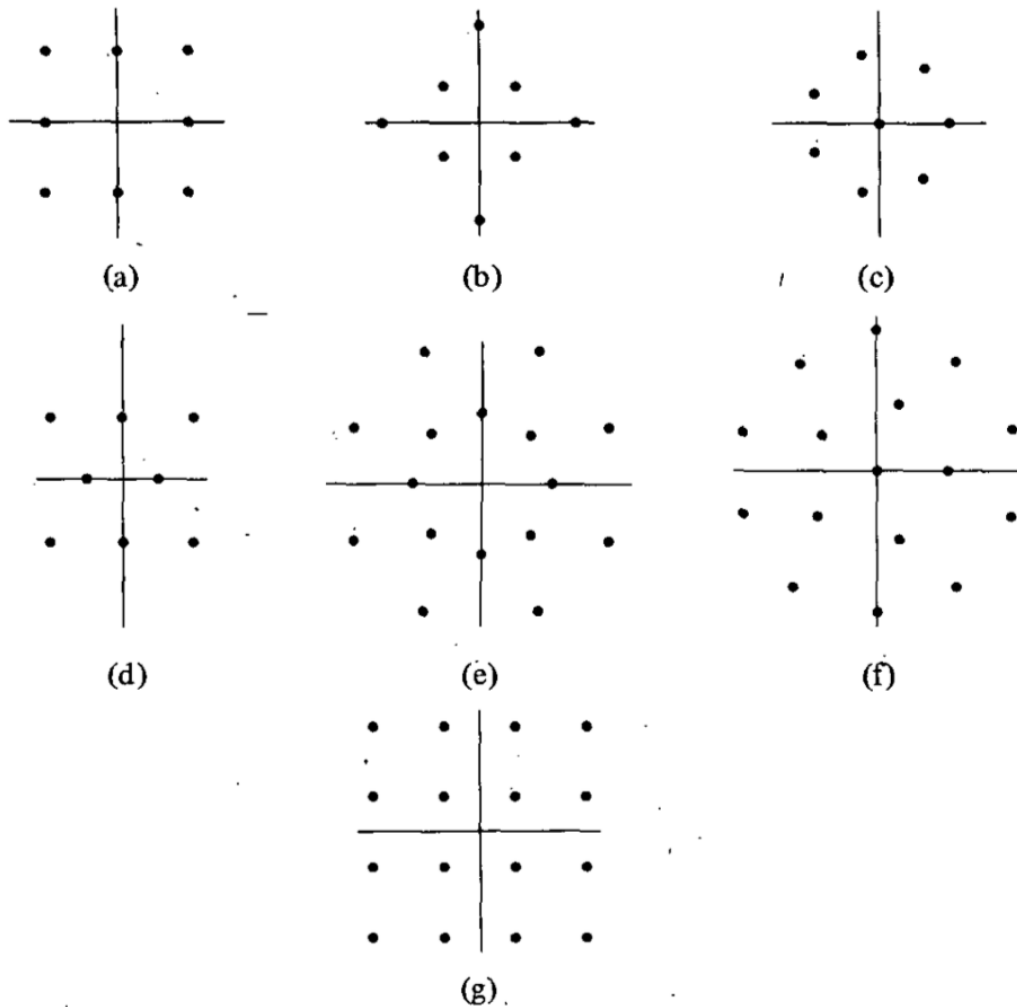


Abbildung 57: Bekannte Signalkonstellationen mit 8 und 16 Punkten, die zum Vergleich herangezogen wurden: (a) Rechteckig; (b) 4-4; (c) 1-7; (d) Dreieckig; (e) 8-8; (f) 1-5-10; (g) 16QAM [21]



Dreieck



Optimierte Konstellation



4-4



Rechteckig



8PSK



1-7

Abbildung 58: Empfangsbilder der 8-Punkt-Konstellationen



## 7 Übertragung verschiedener Dateitypen

In diesem Abschnitt soll behandelt werden, wie sich die Codierung der Sendedaten auf die Übertragungsqualität auswirkt. Dabei wird die Qualität über die gesamte Übertragungsstrecke betrachtet, wozu die Sendedatei mit der Empfangsdatei verglichen wird. Gegenstand der Betrachtung ist also nicht ein Vergleich vorbereiteter Sendesymbole mit den Empfangssymbolen. Das MATLAB-Bilddatenformat, das in dieser Arbeit häufig zur Anwendung kommt, führt zu einem zusätzlichen Programmieraufwand. Die Daten sind in einem dreidimensionalen Array gespeichert und müssen in einen eindimensionalen Vektor umgeschrieben werden, da mit dem Aufbau nur ein einzelner Datenstrom übertragen werden kann. Unabhängig des Dateityps muss eine Anpassung des Wertebereichs auf die verwendete Signalkonstellation erfolgen. Bei gängigen Dateitypen handelt es sich um eindimensionale Bit- bzw. Symbolfolgen. Bei einer Nullfehlerquote kann die Datei ohne genaue Kenntnis des Formats übertragen werden. Die binären Daten sind auszulesen, zu übertragen und danach als Datei wieder abzuspeichern. In dieser Arbeit werden vorwiegend Bilddaten übertragen. Diese können als eine Art Diagramm fungieren, da sie Auskunft über die Fehlerverteilung geben. Der Versand von Dateien geht einher mit Fragestellungen zur Kanalcodierung. Dazu gehören Mechanismen der Fehlerkorrektur bei gestörten Übertragungen. Allerdings sind Generator und Analysator nicht primär zum Dateiversand vorgesehen. Der Schwerpunkt liegt auf der Signalanalyse kürzerer Symbolfolgen. Es soll untersucht werden, wie sich die Signaleigenschaften auf die Übertragung auswirken. Weniger von Interesse ist der Datenverarbeitungsprozess in den Messgeräten und dem Rechner sowie der Datenaustausch zwischen diesen Einheiten. Eine Einschränkung stellt die begrenzte Aufzeichnungslänge des Analyzers dar. So lassen sich ca. 2700 Symbole sicher aufzeichnen. Bei der Verwendung beider Rohde&Schwarz-Geräte beträgt die Zeit zur Übermittlung aus Auslesung eines Symbolpakets ca. 1 s. Hierbei sind in MATLAB noch keine Pausenzeiten gesetzt. Der selbe Prozess fällt mit dem Agilent Generator etwas kürzer aus. Bei beiden Systemen verbessert das Hinzufügen von Pausen zu 0,5 s die Empfangsqualität. Eine Übertragungsdauer von 1,5 s je 2700 Symbole ist weit entfernt von der maximalen Geschwindigkeit. So wären mit Symbolraten ab 1 MHz mindestens 1 Mio Symbole pro Sekunde übertragbar. Bei ausreichend großem Puffer-Speicher des Analyzers könnte die Übertragung in einem Schritt erfolgen. Somit ist es sinnvoll, auch kürzere Symbolfolgen zu Untersuchungszwecken zu übertragen. Damit können sonstige Fehler ausgeschlossen werden, die nicht in Zusammenhang mit dem Signal stehen. So treten beim Empfangsbild Abweichungen auf, die darauf zurückzuführen sind, dass der Analysator nicht "hinterherkommt". Des Weiteren können Quadrantenrotationen zwischen den Übertragungsabschnitten zu Fehlern führen. Dabei ist die Initialfolge, die vor der ganzen Datei übermittelt wird, für einen Abschnitt ungültig. Mit jeder Rotation entstehen hierbei 2700 Symbolfehler. Im Folgenden soll betrachtet werden, welches Resultat ein Symbolfehler abhängig des Dateiformats hat.



## 7.1 MATLAB-Bilddatenformat

Bei unkomprimierten Rastergrafiken, so auch beim MATLAB-Format, kann sich eine Besonderheit ergeben, wenn der Wertebereich einer Konstellation nicht ausreicht, um einen Grundfarbton eines Pixels zu codieren. Als Beispiel soll mit einem 16QAM-Signal ein Bild der Farbtiefe 24 bpp (engl. bits per pixel) übertragen werden. Mit der Farbtiefe wird ausgedrückt, dass der Gesamtfarbton eines Pixels mit 24 Bit codiert ist. Die Grundfarben rot, grün und blau werden jeweils mit 1 Byte, also mit einem Wertebereich von  $2^8 = 256$  codiert. Ein Grundfarbton eines Pixels kann durch 2 Symbole in 16QAM übertragen werden. Die Verwendung hexadezimaler Zahlen macht den Zusammenhang deutlich: Der Wertebereich der Konstellation reicht von 0x0 bis 0xF und die Farbcodierung erfolgt von 0x00 bis 0xFF. Es sei angenommen, dass die 3 Grundfarben eines Bildpunkts hintereinander übertragen werden. Tritt nun in 16QAM 1 Symbolfehler bei 6 übertragenen Symbolen auf, so ermittelt die Funktion "Fehlerrate" eine Symbolfehlerrate von 16,7%. Tatsächlich wird die Gesamtfarbe des Pixels falsch dargestellt. Bei nur einem übertragenen Pixel wäre die Fehlerrate somit bei 100%. Daraus wird deutlich, dass sich Symbol- und Bildfehlerrate auch bei unkomprimierten Grafiken unterscheiden können. Ein Pixel wird in diesem Fall durch 6 Symbole repräsentiert. Ein falsches Symbol macht das ganze Pixel fehlerhaft, ein teilweise korrektes Pixel ist nicht möglich. Daraus wird auch deutlich, dass die Verteilung der Symbolfehler ausschlaggebend ist. Die Bildfehlerrate fällt größer aus, wenn die Symbolfehler einzeln auf viele Pixel verteilt sind. Vereinen sich hingegen mehrere Symbolfehler auf ein Pixel, hat dies bei gleicher Symbolfehlerrate eine geringere Bildfehleranzahl zur Folge. Bei unkomprimierten Bilddateien, die keine Vektorgrafiken sind, äußert sich ein Symbolfehler an der zugehörigen Stelle im Bild.

## 7.2 Windows Bitmap

Das Windows Bitmap (.bmp) Bilddatei-Format ermöglicht neben der unkomprimierten Speicherung von Bilddaten auch eine Lauflängencodierung. Die Angabe einer Anzahl von aufeinanderfolgenden Pixeln gleicher Farbe ist die einzige Möglichkeit bei BMP-Grafiken Speicherplatz zu sparen. Die Header-Länge ist dynamisch, beträgt jedoch meist 54 Byte. Es ist zu erwarten, dass ein Symbolfehler innerhalb des Headers deutliche Auswirkungen auf die Grundeinstellungen hat, oder die Grafik gar unlesbar macht. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass Symbole, die eine RLE-Kompression (engl. run-length encoding) repräsentieren im Abweichungsfall zu einem Farb- oder Lauflängenfehler führen. Damit kann ein Symbolfehler mehrere Pixel verfälschen.

Die Darstellung einer Bitmap-Datei erfolgt in MATLAB durch einen Dezimalvektor. Jede darin enthaltene Dezimalzahl verkörpert ein Byte und kann deshalb Werte von 0 bis 255 annehmen. In Tabelle 8 ist zu erkennen, dass jeder Inhaltsabschnitt mehrere Bytes belegt.



Am Beispiel des Inhalts "Dateigröße" soll dieser Sachverhalt verdeutlicht werden. In Klammern steht der Index, er startet in diesem Fall am Anfang der Datei bei 0:

54(2); 128(3); 1(4); 0(5)

Umkehrung der Reihenfolge entsprechend der Stellenwerte (größter Stellenwert zuerst):  
0; 1; 128, 54

Umwandlung in zweistellige Hexadezimalzahlen:  
0x00; 0x01; 0x80; 0x36

Auflösung der Unterteilung und Entfernung vorangehender Nullen:  
0x18036

Umwandlung in das Dezimalsystem:  
98358

Der Speicherbedarf der Datei beträgt 98,385 kB.

### 7.3 Testmanipulation des Bitmap-Headers mit MATLAB

Bevor eine drahtlose Übertragung verschiedener Dateitypen mit MATLAB erfolgt, ist es sinnvoll zunächst zu analysieren, welche Auswirkungen manipulierte Bytes haben (nicht zu verwechseln mit Bitmanipulation). Bei einem Konstellationsumfang von 256 Symbolen (256QAM) führt ein Symbolfehler zu genau einem fehlerhaften Byte. Bei kleineren Konstellationen kann ein unkorrektes Symbol sogar 2 Bytes verfälschen. Anhand des Beispiels 32QAM kann dies deutlich gemacht werden:

Zu übertragende Symbole bzw. Bytes:  
255; 255...

Anpassung auf den Wertebereich der Konstellation ( $00000_{(2)}$  bis  $11111_{(2)}$ ). Umwandlung der Dezimalwerte in achtstellige Binärzahlen. Auflösen der Achter-Unterteilung (Anzahl Stellen):

$1111111111111111_{(2)}$  (16)...

Verlängerung auf ein Vielfaches von 5:  
 $111111111111111110000_{(2)}$  (20)...

Unterteilung in 5-Bit-Abschnitte:  
 $11111_{(2)}$   $11111_{(2)}$   $11111_{(2)}$   $10000_{(2)}$ ...

Umwandlung in Dezimalzahlen:

31; 31; 31; 16...

Annahme eines Symbolfehlers an der zweiten Stelle:

31; 5; 31, 16...

Umwandlung in fünfstellige Binärzahlen:  $11111_{(2)}$   $00101_{(2)}$   $11111_{(2)}$   $10000_{(2)}...$

Auflösung der Fünfer-Unterteilung. Entfernen der 4 angehängten Nullen:

$111110010111111_{(2)}$  (16)...

Unterteilung in 8-Bit-Abschnitte:

$11111001_{(2)}$   $01111111_{(2)}$

Umwandlung in Dezimalzahlen:

249; 127...

Es wurde deutlich, dass ein fehlerhaftes Symbol bei 32QAM 2 verfälschte Bytes zur Folge haben kann. Um in MATLAB die Binärdaten einer Datei einzulesen, wird die Funktion `fopen` verwendet. Diese erzeugt unter Angabe des Dateinamens (inkl. Dateierweiterung) eine File-ID. Die Datei muss im Arbeitsordner (unterer Pfad Abbildung 60) abgelegt sein. Mit der Funktion `fread` wird die File-ID eingelesen und der zugehörige Datenvektor erzeugt. In den Datenvektor kann über das Workspace eingesehen werden. An der Stelle eines vorgegebenen Index kann ein neuer Wert für ein Byte eingetragen werden. Der Tatsache, dass MATLAB ab 1 indiziert, wird Rechnung getragen, indem im Array-Argument "ByteNr+1" eingetragen wird. Somit lässt sich der übliche Byte-Offset angeben, wie er in Info-Tabellen zum Dateiformat zu finden ist. Zur Abspeicherung der manipulierten Daten in einer Datei, muss eine neue leere Datei gleichen Typs im Arbeitsordner (unterer Pfad Abbildung 60) außerhalb von MATLAB erzeugt werden. Diese Datei wird mit `fopen` unter Angabe des Dateinamens (inkl. Dateierweiterung) und dem Zusatz 'w' wie "write" geöffnet. Die Funktion erzeugt eine weitere File-ID, hier `file_ID2` genannt. Die Datei wird mit der Funktion `fwrite` unter Angabe der File-ID und des Datenvektors beschrieben. Mit der Funktion `fclose` wird die Datei geschlossen. Sie ist nun im MATLAB-Verzeichnis (oberer Pfad Abbildung 60) gespeichert.

Im Bitmap-Header wurden verschiedene Manipulationen durchgeführt, um festzustellen, wie sich ein Symbolfehler durch eine störbehaftete Übertragung an der jeweiligen Stellen auswirkt. Die einzigen Bytemanipulationen, die keinen Einfluss auf die Dateiwiedergabe hatten, betrafen die Speichergröße. So war eine Veränderung der Bytes 2 bis 5 für die gesamte Dateigröße und eine Veränderung der Bytes 34 bis 37 für die Größe

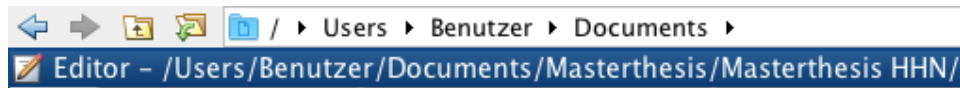


Abbildung 59: Die zu verändernde Datei und die neue Leer-Datei sind im unteren Pfad anzulegen (Eingangspfad). Auf diesen greift die Funktion `fopen` zu. Mit `fwrite` wird die veränderte Datei im oberen Pfad gespeichert (Ausgangspfad).

```

1      %Einlesen und Speichern binärer Daten
2
3      file_ID=fopen('HHN-Musterbild.bmp');
4
5      Datenvektor=fread(file_ID);
6
7      fclose(file_ID);
8
9      ByteNr=5;
10
11     Datenvektor(ByteNr+1)=33;
12     %-----
13
14     file_ID2=fopen('Probekbild.bmp','w');% 'w' fuer 'write'
15
16     fwrite(file_ID2,Datenvektor);
17
18     fclose(file_ID2);
19

```

Abbildung 60: MATLAB-Skript zur Manipulation von Dateien

der Bilddaten wirkungslos. In manchen Abschnitten sind nur bestimmte Zahlenwerte zulässig. So können beispielsweise für die Farbtiefe in bpp nur die Werte 1, 4, 8, 16, 24 oder 32 angegeben werden. Bei allen Wertebeschränkten Inhaltspunkten führt die Eingabe ungültiger Zahlen dazu, dass die Datei nicht mehr geöffnet werden kann. In einer Fehlermeldung wird auf die Beschädigung der Datei hingewiesen (Abbildung 62, oben). Bei den Angaben zum Dateityp, zur Header-Gesamtlänge und zur Länge des Infoheaders führt ein abweichender aber zulässiger Wert ebenfalls dazu, dass die Datei nicht geöffnet werden kann. Auch wenn in aller Regel die Header-Länge statisch ist, so kann auf eine Längenveränderung über die entsprechenden Bytes hingewiesen werden. Ist der Wert zu klein, so werden Header-Daten als Bilddaten bewertet. Ist er zu groß, so werden Bilddaten als Header angesehen. Bei der Bildhöhe und -breite führen zu große Angaben zur Unterbindung der Dateiwiedergabe. Eine zu geringe Höhe schneidet einen Bildteil ab. Bei der Angabe einer zu geringen Breite, wird nicht nur diese reduziert, sondern auch die Farbdarstellung verfälscht. Dies hängt damit zusammen, dass der Umbruch der Bildzeilen verändert wird. Die Angabe zulässiger aber unkorrekter Werte zur Farbtiefe führt zu einer deutlichen Verfälschung der Farbdarstellung im Bild. Eine Datei mit falsch

angegebener Kompressionsart kann nicht geöffnet werden, auch wenn der Wert für das Byte zulässig ist. Wenn eine Lauflängencodierung angegeben wird, obwohl die Bilddaten unkomprimiert vorliegen, führt dies zu Fehlern bei der Decodierung. Der Header wird bei 16QAM mit 106 Symbolen übertragen. Es ist festzustellen, dass Symbolfehler in diesem Abschnitt ein höheres Gewicht haben, als Fehler in den Bilddaten.

## 7.4 Übertragung einer BMP-Datei

Zur Übertragung diverser Dateitypen mit 16QAM wurde eine neue Gesamtdatei erstellt: `Gesamtdatei_divDateitypen_16QAM`. Veränderungen betreffen die Funktionen zum Einlesen und zum Rekonstruieren von Bildern bzw. Dateien. Die neuen Funktionen heißen: `Einlesen_div_Dateiformate_16QAM` und `Datei_Rekonstruktion_16QAM`. In diesen Funktionen muss keine Umwandlung mehr zwischen einem dreidimensionalen Array und einem eindimensionalen Vektor stattfinden. Weiterhin muss aber der 8-Bit-Werteumfang des Datenvektors auf den 4-Bit-Umfang der Signalkonstellation angepasst werden. Die erste Übertragung wurde mit Kabel durchgeführt. In jedem Durchlauf der Sendeschleife fand eine Pause von 0,5 s statt. Die Übertragung fand zu Vergleichszwecken auch mit dem MATLAB-Bilddatenformat statt.

### Kabelübertragung einer unkomprimierten BMP-Datei:

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	-20 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)

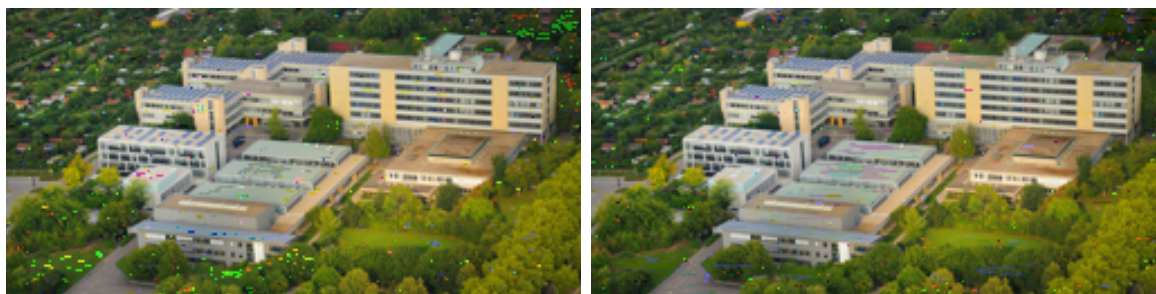


Abbildung 61: BMP-Übertragung mit Kabel. *Links*: Empfangsbild des BMP-Formats. *Rechts*: Empfangsbild des MATLAB-Bilddatenformats der Vergleichsmessung.

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
21,4813	11,7181	12,1652	9,7228	-26,0439	6474	0,0329

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
22,396	12,6019	11,9344	10,5522	-26,1656	10212	0,0519

Tabelle 9: BMP-Übertragung mit Kabel. *Oben:* Signalgenauigkeit des BMP-Formats. *Unten:* Signalgenauigkeit des MATLAB-Bilddatenformats der Vergleichsmessung.

Bei der Kabelübertragung mit einem Generatorpegel von -20 dBm sind sowohl in den Empfangsbildern (Abbildung 61) als auch in den Tabellen zur Signalgenauigkeit (Tabelle 9) nur geringfügige Unterschiede zu erkennen. Der Header wurde vollständig korrekt Übertragen (Tabelle 11, links). Das BMP-Empfangsbild weist keine formatspezifischen Fehler auf. Um die Auswirkungen schlechter Signalqualität auf das BMP-Format zu überprüfen, wurde die Messung als Antennenübertragung über 4 m wiederholt. In jeden Durchlauf der Sendeschleife wurde eine Pause von 1 s eingebaut.

#### **Antennenübertragung einer unkomprimierten BMP-Datei:**

Signalgenerator: Agilent EXG N5172B  
 Signalanalysator: R&S FSQ8  
 Übertragungsmedium: Antenne (Abstand 4 m)  
 Centerfrequenz: 2,44 GHz  
 Symbolrate: 1 MHz  
 Sendepiegel: +15 dBm  
 Ref.-Pegel des Analysators: automatisch  
 Modulationsart: 16QAM (DVB-C)

In der BMP-Antennenübertragung trat eine starke Dämpfung ein, sodass das Sendesignal mit einem Leistungspegel von +15dBm mit einem Pegel von ca. -75dBm beim Empfänger eintraf. Die Symbolfehlerrate erhöhte sich um ungefähr 20 Prozentpunkte (Tabelle 10). Die Übertragungsfehler führten zu 15 inkorrekten Bytes im BMP-Header (Tabelle 11). Die empfangene BMP-Datei konnte nicht geöffnet werden. Vor allem die fehlerhaften Bytes 11 bis 13, die die Header-Länge repräsentieren können dafür verantwortlich gemacht werden. Das Empfangsbild im MATLAB-Bilddatenformat zeigt das charakteristische Rauschen bei Signalschwäche (Abbildung 62).



Abbildung 62: BMP-Übertragung mit Antenne. *Oben:* Fehlermeldung beim Öffnen des Empfangsbilds im BMP-Format *Unten:* Empfangsbild des MATLAB-Bilddatenformats der Vergleichsmessung.

EVM (%)	Magnitude Err (%)	Phase Err (°)	Carrier_Freq Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
25,9136	13,9038	14,6464	11,4447	-74,9518	45356	0,2306

EVM in %	Magnitude Err (%)	Phase Err (°)	Carrier_Freq Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
26,2066	14,1499	14,6540	11,6770	-74,6186	45691	0,2324

Tabelle 10: BMP-Übertragung mit Antenne. *Oben:* Signalgenauigkeit des BMP-Formats. *Unten:* Signalgenauigkeit des MATLAB-Bilddatenformats der Vergleichsmessung.



### Header-Vergleich Kabel

Byte (Offset)	Gesendet	Empfangen
0	66	66
1	77	77
2	54	54
3	128	128
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	54	54
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	40	40
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	1	1
20	0	0
21	0	0
22	128	128
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	1	1
27	0	0
28	24	24
29	0	0
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	0	0
35	128	128
36	1	1
37	0	0
38	35	35
39	46	46
40	0	0
41	0	0
42	35	35
43	46	46
44	0	0
45	0	0
46	0	0
47	0	0
48	0	0
49	0	0
50	0	0
51	0	0
52	0	0
53	0	0

### Header-Vergleich Antenne

Byte (Offset)	Gesendet	Empfangen
0	66	66
1	77	77
2	54	54
3	128	128
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	54	54
11	0	2
12	0	144
13	0	1
14	40	40
15	0	0
16	0	4
17	0	0
18	0	0
19	1	1
20	0	0
21	0	8
22	128	128
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	1	1
27	0	0
28	24	24
29	0	4
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	0	16
35	128	128
36	1	65
37	0	8
38	35	35
39	46	46
40	0	16
41	0	64
42	35	35
43	46	46
44	0	64
45	0	2
46	0	0
47	0	1
48	0	0
49	0	0
50	0	0
51	0	2
52	0	0
53	0	0

Tabelle 11: Gegenüberstellung von gesendeten und empfangenen Header-Daten. Fehler sind gelb markiert.

## 7.5 Übertragung einer BMP-Datei mit RLE-Komprimierung

Bei einer Lauflängencodierung (RLE) wird angegeben, wieviel Pixel gleicher Farbe in einer Reihe aufeinanderfolgen. Dies trifft bei Fotos äußerst selten zu. Bei Computergrafiken, die einheitlich gefärbte Flächen besitzen, kann eine Lauflängencodierung den Speicherbedarf reduzieren. Bei Bitmap ist eine RLE-Kompression nur mit einer Farbtiefe von 8 bpp möglich (entspricht 256 Farben). Bei der BMP-Lauflängencodierung werden immer 2 Bytes zusammengefasst, wovon das Erste die Lauflänge und das Zweite die Farbe angibt. Es sind maximale Lauflängen von 255 Pixel möglich. Wenn beim ersten Byte 0 steht, so gibt das zweite Byte ein Steuerzeichen an. Folgende Steuerbefehle sind dabei möglich:

### **Zweites Byte nach 0    Bedeutung**

0	Zeile zu Ende, neue Zeile
1	Bitmap zu Ende
2	Delta-Modus: Die folgenden 2 Bytes geben den horizontalen und vertikalen Abstand zur aktuellen Position für das nächste Pixel an.

Sollten mehr als 255 aufeinanderfolgende Pixel die selbe Farbe haben, erfolgt die Darstellung über mehrere Lauflängen. Das Hochschullogo, das aus wenigen Farben und einheitlichen Flächen besteht, wurde mit einem Bildbearbeitungsprogramm auf eine Farbtiefe von 8 bpp angepasst und als lauflängencodierte Bitmap-Datei gespeichert. Die Größe beträgt 6,33 kB. Die Größe des unkomprimierten 8-Bit-Bildes beträgt zum Vergleich 32,822 kB. Der Header des lauflängencodierten Bildes hat eine Länge von 502 Byte. Die Wahrscheinlichkeit, dass Übertragungsfehler den Header betreffen, ist gegenüber der unkomprimierten Version erhöht. Das Bild hat eine Breite von 256 Pixel und eine Höhe von 128 Pixel. Das bedeutet, dass eine Lauflänge von 255 Pixel nicht ausreicht, um eine Zeile zu kodieren. Die Darstellung der weißen Fläche ab der letzten Reihe aufwärts hat folgenden Aufbau:

### **Bytes    Bedeutung**

255 94	255 Pixel der Farbe weiß (Farbcode 94)
1 94	1 Pixel der Farbe Weiß
0 0	Neue Zeile

Diese Struktur wiederholt sich für jede weiße Zeile. Eine Lauflänge von 255 Pixel kann bis auf ein Pixel eine Bildzeile codieren. Das verbleibende Pixel muss zusätzlich mit der Lauflänge 1 codiert werden. Bei einer Übertragung können somit folgende Fehlerarten auftreten:

- Header-Fehler
- Lauflängenfehler
- Farbfehler
- Steuerungsfehler (Byte 0)

Bei Farbfehler hängt die Auswirkung von der Lauflänge ab. Dies soll an einem Beispiel durch die Manipulation von Bytes gezeigt werden. Wird die weiße Farbe einer Lauflänge von 255 Byte in schwarz geändert, ist ein deutlicherer Bildfehler zu erkennen als bei einer Lauflänge von 1 Byte.



Abbildung 63: *Oben:* Farbfehler bei einer Lauflänge von 255 Pixel. *Unten:* Farbfehler bei einer Lauflänge von 1 Pixel (schwarzer Punkt).

In Abbildung 63 äußert sich im oberen Bild ein Farbfehler mit großer Lauflänge in Form eines schwarzen Strichs unter dem Schriftzug. Im unteren Bild, mit Farbfehler einer kleinen Lauflänge, ist in der Ecke rechts-unten ein schwarzer Punkt zu sehen. Bei einer Übertragung hat ein Farbfehler die geringsten Folgen. Ein Header-Fehler kann die Datei unlesbar machen. Ein Lauflängenfehler hat zur Folge, dass das Steuerzeichen für die nächste Zeile zu früh oder zu spät kommt. Damit wird die Datei auch unlesbar. Ebenso

ist eine Datei mit Steuerungsfehlern nicht mehr zu öffnen. Mögliche Fehler können hierbei sein: Angabe einer neuen Zeile vor Beendigung der Zeile. Angabe des Bitmap-Ende vor der Abarbeitung aller Bilddaten.

Es sollen nun eine Antennen- sowie eine Kabelübertragung einer laufflängencodierten BMP-Datei erfolgen, um die Auswirkungen von Übertragungsfehlern im Praxisfall zu beurteilen. Zum Vergleich wird das selbe Bild mit einer Farbtiefe von 8 bpp ohne Laufflängencodierung übertragen.

#### **Antennenübertragung einer laufflängencodierten BMP-Datei:**

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepegel:	+15 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)



Abbildung 64: BMP-RLE-Übertragung mit Antenne. *Links*: Empfangsbild mit Laufflängencodierung. *Rechts*: Empfangsbild ohne Laufflängencodierung zum Vergleich.

Entgegen der Erwartung konnte das laufflängencodierte Bild mit einer besseren Signalqualität übertragen werden als das Unkomprimierte. Dies ist aus den Empfangsbildern (Abbildung 64) und der Fehlerauswertung (Tabelle 12) zu erkennen. Häufige Symbolwiederholungen stellen bei der QAM-Übertragung eine Fehlerquelle dar. Der Grund hierfür liegt in der einheitlichen Färbung großer Flächen. Dieser Effekt kam stärker zum Tragen, als eine hohe Gewichtung von Bytefehlern in der Laufflängencodierung.

Zur Verstärkung des Fehlereffekts trug auch die geringe Farbtiefe von 8 bpp bei. Wenn 1 Byte 1 Pixel repräsentiert, dann führt eine Abfolge gleichfarbiger Pixel zu einer Abfolge gleichwertiger Bytes. Wird ein Pixel jedoch durch 3 Byte dargestellt, wie bei 24 bpp, so ergeben sich aus einfarbigen Pixelfolgen nicht unbedingt wertkonstante Bytefolgen. Da

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
17,2867	7,2833	9,4439	5,6440	-55,4039	489	0,0386

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
21,4963	8,8150	11,6153	6,9486	-56,1046	35241	0,519

Tabelle 12: BMP-RLE-Übertragung mit Antenne. *Oben:* Signalgenauigkeit mit Lauflängencodierung. *Unten:* Signalgenauigkeit ohne Lauflängencodierung zum Vergleich.

bei Fotoaufnahmen exakte Farbwiederholungen selten sind, tritt dieser Fehler hierbei auch selten auf. Für Fotos ist allerdings eine Lauflängencodierung nicht lohnenswert. Im dargestellten Fall konnte durch eine RLE-Kompression nicht nur die Datenmenge sondern auch die Symbolfehlerrate reduziert werden. Dies ist nicht gleichbedeutend mit einer höheren Bildqualität. Im RLE-Bild ist der Schriftzug "HHN" deutlich verzerrt. Im unkomprimierten Bild ist die ganze Schrift klar dargestellt. Fehler betreffen nur den Hintergrund. Sie treten in Zeilen auf, die über die ganze Bildbreite weiß sein sollen. Zur Lösung des Problems kann eine Codierung verwendet werden, die Symbolwiederholungen eliminiert. Beispielsweise kann ein Algorithmus implementiert werden, der sendeseitig jedes zweite Symbol nach einer Zuordnungsvorschrift verändert. Auf der Empfangseite muss diese Veränderung entsprechend rückgängig gemacht werden. Die Messung wird als Kabelübertragung wiederholt, um eine mögliche Qualitätsverbesserung feststellen zu können.

#### Kabelübertragung einer lauflängencodierten BMP-Datei:

Signalgenerator: Agilent EXG N5172B  
Signalanalysator: R&S FSQ8  
Übertragungsmedium: Kabel  
Centerfrequenz: 2,44 GHz  
Symbolrate: 1 MHz  
Sendepegel: -20 dBm  
Ref.-Pegel des Analysators: automatisch  
Modulationsart: 16QAM (DVB-C)



Abbildung 65: BMP-RLE-Übertragung mit Kabel. *Links*: Empfangsbild mit Lauflängencodierung. *Rechts*: Empfangsbild ohne Lauflängencodierung zum Vergleich.

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
17,2276	7,1620	9,5589	5,5537	-22,0314	498	0,039

EVM in (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
15,8756	8,2179	8,0612	7,4035	-22,0709	34778	0,512

Tabelle 13: BMP-RLE-Übertragung mit Kabel. *Oben*: Signalgenauigkeit mit Lauflängencodierung. *Unten*: Signalgenauigkeit ohne Lauflängencodierung zum Vergleich.

Bei der Kabelübertragung ist gegenüber der Antennenübertragung in den Empfangsbildern keine Qualitätssteigerung zu erkennen (Abbildung 65). In Tabelle 13 ist in der unteren Auswertung zu sehen, dass der EVM-Wert für die unkomprimierte Übertragung von 21,5 % (Antenne) auf 15,9 % (Kabel) gesenkt werden konnte. Die Symbolfehlerrate erhöhte sich sogar geringfügig. Für die lauflängencodierte Datei sind die Unterschiede der Übertragungsqualität zwischen Antenne und Kabel marginal.

## 7.6 Übertragung einer JPEG-Grafik

Die Dateierweiterung .jpg steht für das JPEG File Interchange Format. Es ist eines von mehreren Dateiformaten für JPEG-Grafiken. JPEG selbst ist kein Dateityp sondern ein Bildkompressionsverfahren, das 1992 von dem ISO-Gremium Joint Photographic Experts

Group (JPEG) veröffentlicht wurde. Die verlustbehaftete JPEG-Komprimierung orientiert sich an den menschlichen Seefähigkeiten. So können Helligkeitsdifferenzen bzw. Kontraste genauer wahrgenommen werden als absolute Farben. Zunächst wird eine Transformation vom RGB-Farbraum in das YCbCr-Farbmodell vorgenommen. Dieses Modell besteht aus der Helligkeitskomponente Y sowie den beiden Komponenten zur Farbigkeit Cb und Cr (Chrominanz blau-gelb, Chrominanz Rot-Grün). Mit der Farbigkeit wird die Abweichung zum Grauwert für einen bestimmten Bildpunkt angegeben. Die Darstellung der reinen Farbigkeit erscheint für den Menschen unscharf. Dementsprechend können diese Komponenten unterabgetastet werden um Speicherplatz zu sparen. Jede Komponente wird in Blöcke der Größe 8x8 Pixel unterteilt. Für diese Blöcke wird eine zweidimensionale diskrete Kosinustransformation ausgeführt. Der Inhalt eines Blockes lässt sich als überlagertes Wellenmuster aus einer horizontalen und einer vertikalen Welle beschreiben. Für jede der beiden Wellen stehen 8 Frequenzstufen zur Auswahl (Abbildung 67). Die Codierung erfolgt also mit 2 Koeffizienten je Komponente und Bildpunkt. So werden die 16 Pixel eines Blockes durch 6 Werte repräsentiert. Für das jpg.-Format soll eine Kabel- und eine Antennenübertragung stattfinden.

#### **Kabelübertragung einer jpg.-Datei:**

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	-20 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)

#### **Antennenübertragung einer laufflängencodierten jpg.-Datei:**

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	+15 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)



Abbildung 66: *Oben:* Übertragung einer JPEG-Datei mit Kabel. *Unten:* Übertragung einer JPEG-Datei mit Antenne.

Die empfangenen .jpg-Dateien konnten mit dem voreingestellten Standardprogramm nicht geöffnet werden. Als Ursache sind Header-Fehler anzusehen. Die Bilder waren jedoch mit Mozilla Firefox und LaTeX zu öffnen. Erwartungsgemäß resultierte aus der Kabelübertragung (Abbildung 66, oben) eine bessere Bildqualität. Die Auswertung der Signalgenauigkeit stützt diese Beobachtung nicht. So ist bei der Kabelübertragung eine geringfügig größere Fehleranzahl eingetreten als bei der Antennenübertragung. Insgesamt ist die Übertragungsqualität bei JPEG-Grafiken nicht zufriedenstellend. Das Format reagiert empfindlich auf Symbolfehler. Da der Speicherbedarf reduziert wurde, kann das Mitversenden von Korrekturredundanzen in Erwägung gezogen werden. In den Empfangsbildern (Abbildung 66) sind jeweils im rechten unteren Bereich die 8x8-Blöcke deutlich zu erkennen.



EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
13,3350	7,1323	6,9757	5,6895	-22,8331	168	0,0043

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
13,5193	7,2277	7,1105	5,7592	-56,1196	163	0,0042

Tabelle 14: JPEG-Übertragung *Oben*: Signalgenauigkeit bei Kabelübertragung. *Unten*: Signalgenauigkeit bei Antennenübertragung.

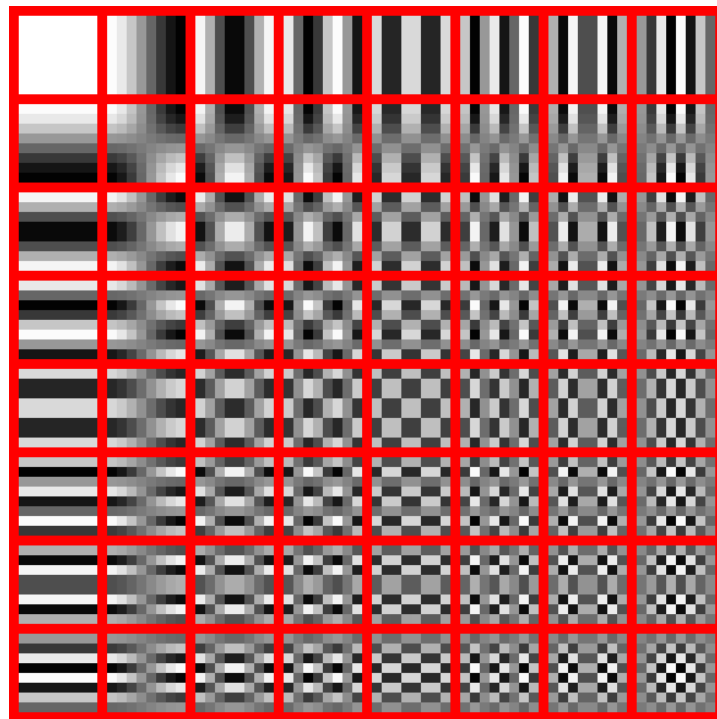


Abbildung 67: Darstellung aller möglichen Kombinationen für einen 8x8-Block [27]. Im linken oberen Block weisen beide Funktionen nur einen Gleichanteil auf. Der horizontale Frequenzanteil erhöht sich nach rechts. Der vertikale Frequenzanteil erhöht sich nach unten. Die übrigen Blöcke stellen Linearkombinationen beider Frequenzanteile dar.

## 7.7 Übertragung einer PNG-Datei

PNG (Portable Network Graphics) ist ein komprimiertes verlustfreies Dateiformat für Rastergrafiken. Gegenüber BMP kann die Kompression in einem höheren Grad stattfinden. Im Vergleich zu JPEG ergeben sich keine Verluste in der Farbqualität, der Speicherbedarf ist allerdings größer. Für die Kompression wird zunächst eine Differenzencodierung vorgenommen. Ausgehend von der Annahme, dass sich benachbarte Pixel in Farbe und Helligkeit nur geringfügig unterscheiden, können verkürzte Differenz-Codes verwendet werden. Optional wird die Wörterbuchmethode angewandt. Für wiederkehrende Muster wird ein neuer Eintrag in einem Verzeichnis, ähnlich einem Wörterbuch angelegt, auf den zurückgegriffen werden kann. Den Hauptteil der Kompression übernimmt die Entropiecodierung. Dazu werden die Farbwerte nach Häufigkeit angeordnet. Häufig vorkommende Werte erhalten kurze Codes, seltene Werte längere [28][29].

Ähnlich wie bei JPEG sind für die Testübertragung empfindliche Reaktionen auf Symbolfehler zu erwarten. Das Format PNG besitzt einen Header, dessen Beschädigung sich deutlich auswirkt. Ein Fehler in den Bilddaten führt nicht nur zu einem einzelnen Pixelfehler.

### Antennenübertragung einer PNG-Datei:

Signalgenerator: R&S SMJ100A  
Signalanalysator: R&S FSQ8  
Übertragungsmedium: Antenne (Abstand 4 m)  
Centerfrequenz: 2,44 GHz  
Symbolrate: 1 MHz  
Sendepegel: +15 dBm  
Ref.-Pegel des Analysators: automatisch  
Modulationsart: 16QAM (DVB-C)

EVM (%)	Magnitude_ Err (%)	Phase_ Err (°)	Carrier_Freq_ Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
9,9316	5,2419	5,3724	4,1711	-56,2420	23	1,6568E-04

Tabelle 15: Übertragung einer PNG-Datei. Signalgenauigkeit bei Antennenübertragung.

Trotz geringer Symbolfehlerrate haben sich die einzelnen Abweichungen massiv auf die Bildqualität ausgewirkt.



Abbildung 68: Empfangsbild des PNG-Formats einer Antennenübertragung

## 7.8 Übertragung einer Excel-Datei (.xlsx)

Zu Testzwecken wurde eine Excel-Tabelle mit Messwerten der Signalgenauigkeit übertragen. Die Datei enthält Spalten- und Zeilenbeschriftungen sowie Kommazahlen. Der mit Daten gefüllte Tabellenbereich ist mit schwarzen Balken eingerahmt. Der Dateiversand wurde mit den üblichen Einstellungen als Kabel- und Antennenübertragung ausgeführt.

### Kabelübertragung einer xlsx.-Datei:

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	-20 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)

### Antennenübertragung einer xlsx.-Datei:

Signalgenerator:	Agilent EXG N5172B
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	+15 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
16,1648	8,1020	7,0485	6,2445	-22,2035	619	0,0314

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
13,5193	7,2277	7,1105	5,7592	-56,1196	163	0,0042

Tabelle 16: Übertragung einer Excel-Datei *Oben*: Signalgenauigkeit bei Kabelübertragung. *Unten*: Signalgenauigkeit bei Antennenübertragung.

Die Empfangsdateien beider Übertragungsmedien konnten weder mit Excel noch mit Numbers geöffnet werden. Aus Tabelle 16 ist zu erkennen, dass die Antennenübertragung zu einer Symbolfehlerrate im Promille-Bereich geführt hat. Eine derart geringe Fehlerrate hätte bei der Übertragung unkomprimierter Grafiken zu keiner sichtbaren Einschränkung geführt. Die niedrige Fehlertoleranz lässt sich mit dem Dateiformat .xlsx erklären. Dieses Format enthält neben den Tabellenzellenwerten auch noch allgemeine Dateiinformationen sowie Angaben zur Formatierung und graphischen Darstellung [30]. Treten bei diesen Daten ungültige Werte auf, so bricht das Programm den Dateiöffnungsprozess ab. Es ist in Erwägung zu ziehen, den Excel kompatiblen Dateityp .csv (Comma-separated values) zu verwenden. Dieses Format enthält neben den Tabellenwerten Befehle zum Zeilenumbruch und zur Spaltenaufteilung, woraus sich eine höhere Fehlertoleranz ergeben sollte [31].

## 7.9 Übertragung einer Text-Datei (.txt)

Da die empfangenen .xlsx-Dateien nicht zu öffnen waren, soll die Übertragung alphanumerischer Zeichen nun an einer Text-Datei (.txt) getestet werden. Dazu dient ein Textausschnitt dieser Arbeit, nämlich der Absatz “Übertragung einer JPEG-Grafik“. Die Übertragung soll sowohl mittels Kabel als auch mittels Antenne erfolgen.

### Kabelübertragung einer txt.-Datei:

Signalgenerator: Agilent EXG N5172B  
Signalanalysator: R&S FSQ8  
Übertragungsmedium: Kabel  
Centerfrequenz: 2,44 GHz  
Symbolrate: 1 MHz  
Sendepegel: -20 dBm  
Ref.-Pegel des Analysators: automatisch  
Modulationsart: 16QAM (DVB-C)

### Antennenübertragung einer txt.-Datei:

Signalgenerator: Agilent EXG N5172B  
Signalanalysator: R&S FSQ8  
Übertragungsmedium: Antenne (Abstand 4 m)  
Centerfrequenz: 2,44 GHz  
Symbolrate: 1 MHz  
Sendepegel: +15 dBm  
Ref.-Pegel des Analysators: automatisch  
Modulationsart: 16QAM (DVB-C)

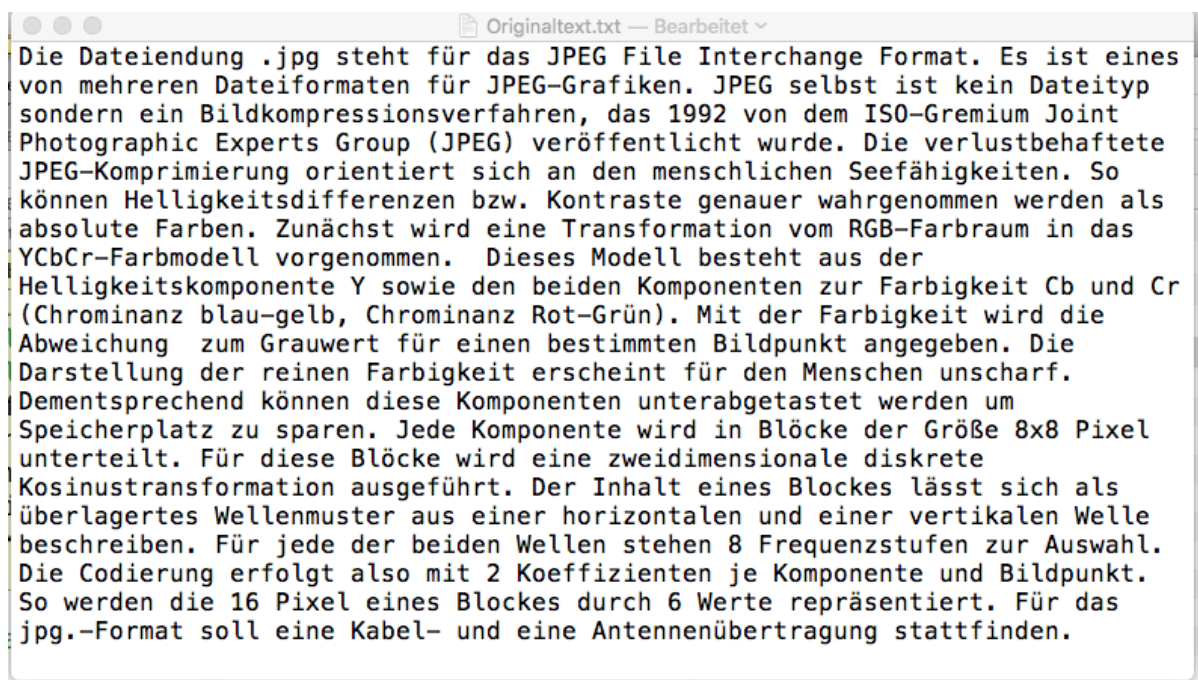


Abbildung 69: Gesendeter Originaltext des Abschnitts "Übertragung einer JPEG-Grafik"



Die Kabelübertragung einer Text-Datei führt zu geringfügig besseren Ergebnissen als die Antennenübertragung einer solchen. Im kabelübertragenen Text (Abbildung 70) sind etwas weniger Zeichenfehler enthalten, als im antennenübertragenen (Abbildung 71). In Tabelle 17 ist zu sehen, dass mittels Kabel Fehleranzahl und Symbolfehlerrate etwas kleiner ausgefallen sind als mittels Antenne. Die Übertragungsqualität für Text-Dateien ist über beide Wege nicht zufriedenstellend. Bei der Übertragung unkomprimierter Fotoaufnahmen konnte mit 16QAM eine deutlich bessere Qualität erreicht werden. Jedoch wurde dabei auch der Signalgenerator R&S SMJ100A verwendet. Die erhöhte Fehlerrate lässt sich nicht durch vielfache Symbolwiederholungen erklären. Dies wurde durch eine Analyse der gesendeten Bytefolge festgestellt.

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
23,8809	12,0782	10,2141	10,0757	-22,0789	487	0,1559

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err (°)	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
23,4455	11,8220	10,1475	9,7790	-50,3076	517	0,1655

Tabelle 17: Übertragung einer Text-Datei (.txt). *Oben:* Signalgenauigkeit bei Kabelübertragung. *Unten:* Signalgenauigkeit bei Antennenübertragung.

## 8 Messungen mit benutzerdefinierten Filtern

Das komplexe Basisbandsignal wird sowohl im Signalgenerator als auch im Analysator automatisch gefiltert. In diesem Kapitel soll auf die benutzerdefinierten Möglichkeiten zur Filterung eingegangen werden.

### 8.1 Intersymbolinterferenz (Symbolübersprechen)

Zur Verhinderung der Intersymbolinterferenz (ISI) werden Pulsformungsfilter eingesetzt. Wie schon erwähnt, ist die Intersymbolinterferenz eine Übertragungsstörung, bei der zeitlich abfolgende Symbole ineinander fließen. Ursächlich sind verschiedene frequenzabhängige Gruppenlaufzeiten. Der Begriff der Dispersion beschreibt eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen von der Frequenz. Steilflankige Impulse enthalten hohe Spektralanteile, deren Laufzeitverzögerungen zu zeitlichem Überfließen in das Nachfolgesymbol führen. Dies behindert eine korrekte Demodulation. Mit ISI-Filtern werden hohe Frequenzanteile ausgefiltert und die Intersymbolinterferenz unterbunden [32].

### 8.2 Verwendung von ISI-Filter

Gängige Filtertypen zur ISI-Filterung sind Raised-Cosine (RC), Root-Raised-Cosine (RRC) und Gauß. Dabei handelt es sich jeweils um digitale Filter. RC- und RRC-Filter besitzen eine endliche Impulsantwort (FIR - engl. finite impulse response). Der Raised-Cosine-Filter ist ein Tiefpass, dessen Übertragungsfunktion bei höheren Frequenzen kosinusförmig abfällt. Die Quadratwurzel dieses Filters entspricht dem Root-Raised-Cosine-Filter. Beim Gauß-Filter weisen sowohl die Übertragungsfunktion als auch der Frequenzgang die Form einer Gaußschen Glockenkurve auf [33] [34].

### 8.3 Einstellung benutzerdefinierter Filter

Die generatorseitige Einstellung benutzerdefinierter Filter kann entweder direkt am Gerät oder mithilfe des Software-Tools filt wiz erfolgen. In beiden Fällen ist nur eine Einstellung im Custom Digital Modulation Mode möglich, nicht aber im Arbitrary Mode (ARB), der in dieser Arbeit überwiegend verwendet wird. In ARB findet ein Teil der Modulation auf dem Steuerrechner statt. An den Signalgenerator werden Signalepunkte mit ihren kartesischen Koordinaten übertragen. Im Custom Mode werden Symbol-Dateien an den Signalgenerator exportiert. Die Modulation findet vollständig im Generator statt. Die Export-Dateien sind vom Typ `.dm_iqd`. Sie sind nach einer speziellen Formatvorlage mit Header zu konstruieren. Es ergeben sich einige Nachteile, grundsätzlich alle Datenübertragungen mit dem Custom Mode durchzuführen. Die Aufzeichnungslänge des Signalanalysators ist auf ca. 2700 Symbole beschränkt. Für alle Dateien, die diesen



Umfang überschreiten, muss eine Aufteilung stattfinden. Es genügt dabei keine einfache Aufteilung der Nutzdaten wie im ARB Mode. Jede Teildatei muss einen Header besitzen. Der Header ist mit ASCII-Zeichen zu schreiben. Die Nutzdaten sind binär darzustellen. Dazu ist die Verwendung verschiedener Editor-Einstellungen notwendig. Alle Teildateien sind in den Generator zu exportieren. Für einen automatisierten Übertragungsprozess müssen über SCPI-Befehle die Teildateien nacheinander geladen werden. Bei der Direkteingabe am Gerät können nur 64 Bits eingestellt werden. Die Fehlerauswertung und Filterbeurteilung soll mit der Übertragung eines Dateiteils von 2700 Symbolen erfolgen.

#### **Gefilterte Antennenübertragung einer Grafik im MATLAB-Bilddatenformat:**

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Antenne (Abstand 4 m)
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepegel:	-4...10 dBm
Ref.-Pegel des Analysators:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (DVB-C)
Filtereinstellung am Generator:	Cosine (a), Raised-Cosine (b), Gauss (c)
Filtereinstellung am Analysator:	RC (a), RRC (b), Gauss [Pure] (c)

Leistungspegel Generator (dBm)	Fehleranzahl Raised-Cosine	Fehleranzahl Root-Raised-Cosine	Fehleranzahl Gauß
10	0	0	0
9	0	0	0
8	0	0	10
7	4	0	5
6	21	5	12
5	36	0	237
4	7	0	41
3	147	0	90
2	65	4	109
1	162	0	255
0	285	0	195
-1	27	27	264
-2		172	366
-3		14	408
-4		350	

Tabelle 18: Symbolfehleranzahl bei einem Übertragungspaket von 2700 Symbolen mit verschiedenen Filtereinstellungen

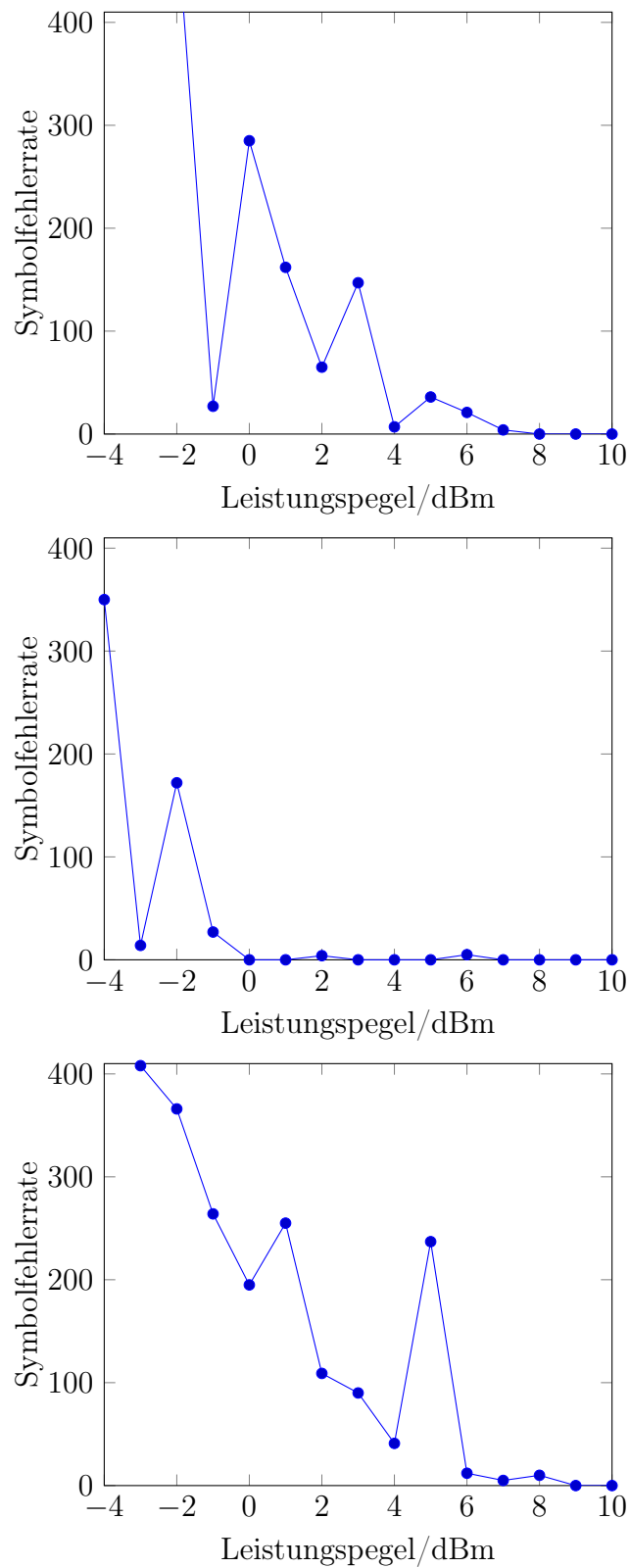


Abbildung 72: Symbolfehlerrate in Abhängigkeit des Leistungspegels mit Raised-Cosine-Filter (oben), Root-Raised-Cosine-Filter (Mitte) und Gauß-Filter (unten)

Die Leistungsuntergrenze kennzeichnet den Wert, ab dem eine Initialfolge mit 4 Symbolen richtig übertragen wurde. Die besten Ergebnisse konnten mit dem Root-Raised-Cosine-Filter erreicht werden. Hierbei war eine Übertragung ab einem Generator-Pegel von -4 dBm möglich. Ab 0 dBm traten keine Symbolfehler mehr auf. Am wenigsten geeignet hat sich das Gauß-Filter. Es konnte zwar bei geringeren Pegeln als bei Raised-Cosine schon eine Übertragung stattfinden, die Fehleranzahl fiel jedoch größer aus.

## 9 Übertragungen ohne Trigger-Leitung

### 9.1 Grundlagen zur Synchronisation

Die Synchronisation bezieht sich nicht auf die Triggerung der Welle sondern auf die Synchronisierung der Symbolfolge. Vor allem bei der unidirektionalen Telekommunikation wie z.B. Digitalfernsehen (DVB - engl. Digital Video Broadcasting) ist die Synchronisation von großer Bedeutung. Hierbei kann der Empfänger keine Signale zur Anfrage an den Sender übermitteln. So ist es auch nicht möglich, Wiederholungsanforderungen dem Sender zukommen zu lassen. Zur korrekten Decodierung der empfangenen Symbolfolge ist die Information erforderlich, an welcher Symbolstelle der Code beginnt, beispielsweise für ein neues Bild. Dies kann mithilfe eines Burst-Pakets geschehen, bei welchem anhand einer vordefinierten Datenfolge ein Beginn erkannt wird.

### 9.2 Unterschiede zwischen Praxisfall und Versuchsaufbau

Im Versuchsaufbau besteht zwischen Sender und Empfänger immer eine Verbindung über das Netzwerk und den Rechner. Diese Verbindung ist auch nach dem Entfernen von Referenzfrequenz- und Triggerleitung noch vorhanden. Während der HF-Weg ein unidirektionales System darstellen soll, ist das gesamte System bidirektional. Der Zusammenhang wird deutlich, wenn die Initialfolge nicht korrekt empfangen wird und eine Wiederholung der Abschnittsübertragung erfolgt. Der Sender erfährt dabei über den Fehlempfang. Eine Information ist zurück gelangt. Im Praxisfall besteht zwischen beiden Punkten keine weitere Verbindung als über den Drahtlosweg. In einem unidirektionalen System (z.B. TV) erfährt der Sender über einen fehlerhaften Empfang nichts. Für eine realistische Nachstellung des Praxisfalls, müssten Generator und Analysator jeweils an separaten PCs hängen. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Eigenschaft, dass die PC-Ansteuerung über MATLAB nicht echtzeitfähig ist. Wird der ganze Prozess mit einem einzelnen PC gesteuert, so erfolgt der Datenversand durch einen MATLAB-Befehl, ein darauffolgender Befehl liest die Empfangsdaten aus. In dieser Abfolge wird das Skript schrittweise umgesetzt. Die Dauer der Umsetzung eines Befehls wird vor allem durch die Kommunikation zwischen dem PC und den Messgeräten bestimmt. Dabei ist der Zeitaufwand zum Auslesen der Analyzer-Daten am größten. Teilweise war es hierfür notwendig, in MATLAB Pausenzeiten einzufügen, um dem Analyzer genügend Zeit zu geben, die Daten an den PC zu übermitteln. Nach dem Ausführen des Befehls `Senden` verschickt der Signalgenerator die Datenfolge in einer Dauerschleife. Für eine Übertragung ohne ständige Wiederholung wäre es notwendig, den Sende- und Empfangsbefehl zeitgleich auszuführen. Der Analyzer hat eine beschränkte Aufzeichnungslänge von ca. 2700 Symbolen. Zur Übertragung größerer Dateien ist eine Aufteilung in Abschnitte der Aufzeichnungslänge vonnöten. Diese abschnittsweise Übertragung weicht ebenfalls vom

Praxisfall ab. Im Folgenden soll die Übertragung eines einzelnen Abschnitts behandelt werden: Der Analyzer benötigt die Information, an welcher Stelle im kontinuierlichen Datenstrom eine Wiederholung einsetzt. Diese Synchronisation kann über eine Triggerleitung erfolgen. Der Generator verfügt über einen Marker-Anschluss, durch den ein Spannungsimpuls zu Anfang einer Wiederholung ausgegeben wird. Es sollen nun Optionen zur Synchronisation ohne Triggerleitung beleuchtet werden.

### 9.3 Synchronisation durch Leistungsspitzen im Sendesignal

Der Analyzer besitzt eine Funktion zur Synchronisation anhand der Signalleistung. Im Trigger-Menü kann mit dem Softkey "IF POWER" die Triggerung der Messung durch Signale, die sich außerhalb des Messkanals befinden, aktiviert werden. *Außerhalb des Messkanals* bedeutet, dass die Triggersignale eine deutlich größere Leistung aufweisen, als der Signalteil, der die Information enthält. Im Konstellationsdiagramm lässt sich das Triggersignal als Punkt außerhalb des vordefinierten Symbolpunktefelds darstellen. Im Analyzer ist dazu die Schwellenleistung einzustellen, ab welcher die Triggerung stattfindet. Wird diese mit einer positiven Flanke überschritten, löst der Trigger aus.

Die Implementierung des Triggers in einer Software zur Bild- und Dateiübertragung betrifft die Funktionen **Senden** und **Empfang**. Die MATLAB-Funktion zum **Senden** überträgt die Koordinaten der Konstellationspunkte an den Signalgenerator. Diese Koordinaten können mithilfe einer Modulationsfunktion erstellt aber auch manuell eingegeben werden. Im Fall 16QAM werden aus den Sendesymbolen mit der Funktion `modem.qammod` die Koordinaten erstellt und als komplexe Zahlen in einem Vektor gespeichert. Dieser Vektor soll nun durch die Koordinaten eines zusätzlichen Punkts ergänzt werden, der außerhalb des Messkanals liegt (Abbildung 73). Da der Trigger-Punkt am Anfang des Symbolpakets übertragen werden soll, wird ein neuer Vektor erstellt und der Punkt an dessen erster Stelle eingetragen. Ab Index 2 werden die Nutzdaten eingetragen. In der Funktion **Empfang** muss dies wieder rückgängig gemacht werden (Abbildung 74). Das erste Empfangssymbol eines Abschnitts ist zu entfernen. Der Analyzers bewertet den empfangen Zusatzpunkt als Symbol-Information. Er ordnet ihm den Symbolwert des nächst gelegenen Konstellationspunkts zu. Der Empfangsvektor wird ab Index 2 in einen neuen Vektor übertragen, der dann nur noch die Nutzdaten enthält.

```

65
66 - QAM_data_mit_Trigger(1)=6+6i;
67 - QAM_data_mit_Trigger(2:length(QAM_data)+1)=QAM_data(1:length(QAM_data));
68
69 - I_data = real( QAM_data_mit_Trigger );
70 - Q_data = imag( QAM_data_mit_Trigger );
71
72
73 % *****
74 % Setup Waveform Structure
75 % *****
76
77 - IQInfo.I_data      = I_data;
78 - IQInfo.Q_data      =Q_data;

```

Abbildung 73: Hinzufügen eines Trigger-Punkts am Anfang des Sendevektors in der Funktion `Senden_Trigger_16QAM`. In diesem Beispiel wurde der Trigger-Punkt mit einem großen Leistungsabstand zum Messkanal gewählt. Er hat die Koordinaten  $6 + 6i$ . Der nächst gelegene Symbolpunkt hat die Koordinaten  $3 + 3i$ .

```

29 %% Convert string to num
30 - out = str2num(result.text);
31
32 - out_ohneMarker(1:length(out)-1)=out(2:length(out));
33 % delete instrument object
34 - delete( InstrObject );
35

```

Abbildung 74: Entfernen des Trigger-Punkts am Anfang des Empfangsvektors in der Funktion `Empfang_Trigger_16QAM`

Probleme dieses Konzepts zur Triggerung ergeben sich bei einer Leistungsbeschränkung. Für den Zusatzpunkt ist es notwendig, eine deutlich größere Leistung zu haben, als die maximale Leistung der Nutzdatenpunkte. Bei einer Übertragung von 2700 Symbolen bei geringem Störabstand können Ausreiser der Rauschwolken die Triggerschwelle erreichen, wenn diese nicht hoch genug eingestellt wurde. Im Fall von starker Dämpfung, wie sie bei Antennenübertragungen auftritt, muss mit der maximalen Generatorleistung gesendet werden. Ein Zusatzpunkt noch höheren Pegels mit großem Leistungsabstand zu den Symbolpunkten lässt sich dabei nicht mehr realisieren. Wird die maximale Sendeleistung verwendet um den Trigger-Punkt zu erzeugen, so wird die Leistung der übrigen Punkte generatorseitig herunterskaliert, wodurch ein sicherer Empfang nicht mehr gewährleistet werden kann.

## 9.4 Synchronisation durch Leistungsabschaltung im Sendesignal

Um das im vorangegangenen Abschnitt geschilderte Problem zu lösen, kann eine Triggierung auch mittels vorübergehender Abschaltung des Sendesignals ausgeführt werden. Dazu wird nach selbigem Prinzip mit den Funktionen **Senden** und **Empfang** ein Zusatzpunkt am Vektorbeginn eingefügt bzw. entfernt. Die Koordinaten dieses Punktes werden jedoch zu  $0 + i0$  gewählt (Abbildung 75). Nach dem letzten Symbolpunkt des vorherigen Sendeabschnitts wird die Leistung kurzfristig auf 0 mW gesenkt. Bei anschließendem Leistungsanstieg wird die Triggerschwelle mit einer positiven Flanke überschritten. Die Schwellenleistung ist in diesem Fall deutlich unter der maximalen Empfangsleistung einzustellen. Allerdings ergibt sich hierbei das gegenteilige Problem im Vergleich zum vorangegangenen Prinzip. Der Schwellenpegel muss ausreichend niedrig eingestellt werden. Sollte bei einem Symbolübergang die Trajektorie nahe des Nullpunkts verlaufen, wird die Schwellenleistung unterschritten und kurz darauf mit ansteigender Flanke wieder überschritten, wodurch eine Triggierung ausgelöst wird und es zu einer Fehlsynchronisation kommt.

```
65
66 -   QAM_data_mit_Trigger(1)=0+0i;
67 -   QAM_data_mit_Trigger(2:length(QAM_data)+1)=QAM_data(1:length(QAM_data));
68
69 -   I_data = real( QAM_data_mit_Trigger );
70 -   Q_data = imag( QAM_data_mit_Trigger );
71
72
73   % *****
74   % Setup Waveform Structure
75   % *****
76
77 -   IQInfo.I_data      = I_data;
78 -   IQInfo.Q_data      = Q_data;
```

Abbildung 75: Hinzufügen eines Trigger-Punkts mit den Koordinaten  $0 + 0i$  innerhalb der Funktion **Senden\_Trigger00\_16QAM**, der eine vorübergehende Absenkung der Signalleistung bewirken soll.

## 9.5 Bildübertragung mit Triggierung durch Sendeleistung

Es wurde eine Kabelübertragung eines Bildes im MATLAB-Format durchgeführt, wozu der Analyzer in den Trigger Mode "IF Power" versetzt wurde. Der Trigger-Pegel wurde zu -18 dBm eingestellt.

**Bildübertragung mit Trigger außerhalb des Messkanals:**

Signalgenerator:	R&S SMJ100A
Signalanalysator:	R&S FSQ8
Übertragungsmedium:	Kabel
Centerfrequenz:	2,44 GHz
Symbolrate:	1 MHz
Sendepiegel:	-20 dBm
Ref.-Pegel des Analysator:	automatisch
Modulationsart:	16QAM (Mapping: DVB-C)
Ref.-Freq. des Analysators:	extern
Trigger des Analysators:	IF Power (-18 dBm)
Aufzeichnungslänge:	2700 Symbole



Abbildung 76: Empfangsbild mit Triggererung durch Sendeleistung. Der Trigger befindet sich außerhalb des Messkanals.

EVM (%)	Magnitude_Err (%)	Phase_Err Grad	Carrier_Freq_Err (Hz)	Mean Power (dBm)	Fehleranzahl	Symbolfehlerrate
22,5577	12,7677	11,9423	10,5985	-24,1715	27038	0,1375

Tabelle 19: Empfangsbild mit Triggererung durch Sendeleistung. Der Trigger befindet sich außerhalb des Messkanals.

Die Übertragung konnte nicht mit Antenne durchgeführt werden, da die hohe Dämpfung eine große Sendeleistung für die Nutzdaten erforderlich macht. Dementsprechend stehen keine Reserven mehr zur Verfügung, eine höheren Leistungspegel für die Triggerung auszusenden. Bei der Übertragung ergab sich eine Symbolfehlerrate von ca. 13,8 %.



Dies ist deutlich mehr als bei einer vergleichbaren Übertragung mit Trigger-Leitung. Im Abschnitt "Variation der Modulationsart" wurde für 16QAM bei der Kabelübertragung eine Symbolfehlerrate von 0,3 % erreicht. Allerdings wurde ein anderes Bild übertragen. Die erhöhte Fehlerrate wurde durch einige Fehltriggerungen ausgelöst. Dafür sind Ausreiser unter den Empfangspunkten verantwortlich zu machen, die den Trigger-Pegel überschritten.

Es konnte keine Übertragung stattfinden, bei der die Triggerung durch Leistungsabschaltung oder -absenkung erfolgt. Die Funktion ist explizit für Triggerpunkte außerhalb des Messkanals ausgelegt. Eine Auswahl innerhalb des Leistungsspektrums der Nutzdaten führte zu einer andauernden Fehltriggerung. Die Symbolfehlerrate war so hoch, dass keine Initialsymbole korrekt übertragen werden konnten. Ohne die damit verbundene Korrektur, ist die Fehlermessung nicht aussagekräftig.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte eine HF-Übertragungsstrecke aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Die Übertragung erfolgte per Kabel oder Antenne. Es konnten einzelne Symbole übertragen werden aber auch ganze Dateien. Es gelang, Bilder im MATLAB-Format, unkomprimierte und komprimierte Rastergrafiken sowie Textdateien zu übertragen. Bei allen Übertragungen wurden Analysedaten zur Genauigkeit gewonnen. Die Übertragungen wurden unter Variation der Parameter ausgeführt, um die Signifikanz der Einflussgrößen zu bestimmen. In diesem Abschnitt sollen einzelne Zusammenfassungen zu den verschiedenen Aspekten der Arbeit gegeben werden.

### 10.1 Übertragungshardware

Die Signalgeneratoren und der Analysator sind für die Arbeit im Labor konzipiert. Gegenüber drahtlos kommunizierenden Elektrogeräten für Endverbraucher (z.B. Smartphone) weisen die Labor-Geräte hohe Genauigkeiten auf, so bei Trägerfrequenz, Symbolrate und Leistungspegel. An den Geräten können sehr individuelle Einstellungen vorgenommen werden. Am Signalgenerator R&S SMJ100A kann das Signal aus importierten Symboldaten geräteintern moduliert werden. Daneben können auch Signalform-Daten von einem PC an das Gerät übermittelt werden. Am Generator lassen sich benutzerdefinierte Filter einstellen mit Filtertyp und Parameter. Es können diverse Marker bzw. Trigger eingestellt werden. Zudem ist es möglich, Fehler zu simulieren. Die einstellbaren Frequenzen für den Träger reichen vom kHz-Bereich bis zu den Mikrowellen. In den Versuchen ließ sich der Leistungspegel maximal nur auf 15 dBm festlegen, was deutlich unter der Spitzenleistung von Mobiltelefonen liegt. Für eine Telekommunikationsanwendung über das Labor hinaus würde ein Verstärker benötigt. Der Signalanalysator kann Frequenzen von 20 Hz bis 8 GHz visualisieren. Er ermöglicht die Darstellung des Frequenzspektrums sowie eine Anzeige der Signaltrajektorie im Konstellationsdiagramm. Zusätzlich findet eine genaue Fehlerauswertung statt. Er verfügt allerdings nur über einen Aufnahmespeicher von ca. 2700 Symbolen. Die Stärken der Geräte liegen also in der Präzision und den Konfigurationsmöglichkeiten. Nicht optimiert sind sie hingegen für den schnellen Versand großer Datenmengen. Die Übertragung von Dateien in dieser Arbeit diente primär zur Veranschaulichung der Signalqualität. Es konnten Untersuchungen und Optimierungen hinsichtlich dieser Qualität durchgeführt werden. Hingegen ist es kaum möglich Maßnahmen zur Geschwindigkeitsoptimierung zu erproben.

### 10.2 Dateiformate

Die Auswirkungen von Fehlern bei der Dateiübertragung hängen in hohem Maße von ihrem Format ab. Grundsätzlich kann gesagt werden, je mehr Steuerbefehle eine Datei

enthält, desto empfindlicher reagiert sie auf Symbolfehler. Dies machte sich vor allem bei komprimierten Bildern bemerkbar. Ohne Kompression traten Pixelfehler an den Stellen auf, wo sich Symbolfehler befanden. Das Bild war damit eine Art Diagramm. Die Fehlergrößen von “Modulation Accuracy“, die der Analysator selbst berechnete, haben nur eine geringe Aussagekraft. Der Analysator orientiert sich dabei an einer rekonstruierten Referenz. Die Korrektheit dieser kann nicht garantiert werden. Die Bedeutung von Symbolfehleranzahl und -rate hängt vom Dateiformat ab. Bei der Übertragung einer Excel-Datei konnte trotz niedriger Symbolfehlerrate die Empfangsdatei nicht geöffnet werden. Einen unerwartet großen Einfluss auf die Signalqualität hatte die Übertragung von Symbolwiederholungen. Für diesen Faktor konnte die höchste Signifikanz festgestellt werden. Es lohnt sich somit alles daran zu setzen Symbolwiederholungen zu vermeiden.

### **10.3 Optimierte benutzerdefinierte Signalkonstellation**

Mit einer optimierten Signalkonstellation konnte unter 2 Bedingungen tatsächlich eine Verbesserung der Signalqualität erreicht werden. Zum einen musste der Leistungspegel so weit reduziert werden, dass das Rauschen in benachbarte Entscheidungsbereiche hineinragt. Zum anderen hatten manche individuellen Konstellationen eine Verlangsamung der Rechenzeit zur Folge. Zur Korrektur war es nötig, Pausenzeiten einzubauen. Ohne diese Gegenmaßnahme wirkt sich die Verzögerung mehr auf die Signalqualität aus als die Konstellationsoptimierung.

### **Fazit**

Die Arbeit hat die große Bedeutung der Kanalcodierung herausgestellt. Darunter werden Redundanzen verstanden, die zur Korrektur von Datenfehlern dienen. Es konnten nur wenige Übertragungen erfolgen, die vollständig fehlerfrei waren. Ebenso verhält es sich im Praxisfall. In der drahtlosen Übertragungstechnik treten fast immer Fehler auf. Gleichzeitig werden überwiegend komprimierte Daten übertragen, sodass sich diese Fehler deutlich auswirken. Komplexe Algorithmen werden gebraucht, um die Fehler auszugleichen. Es ist zudem ein erheblicher Speicheraufwand für diese Korrektur nötig. Die Redundanzen, die mit dem Signal versandt werden, machen einen beachtlichen Anteil aus.

## 10.4 Kurzanleitung

Für eine Übertragung, gesteuert durch den Desktop-PC in Raum F223, sind Generator und Analysator über Ethernet-Kabel an das lokale Netzwerk anzuschließen. Für die Verwendung einer gemeinsamen Referenzfrequenz ist der Generator-Anschluss “REF OUT“ mit dem Analysator-Anschluss “REF IN 1...20 MHz“ zu verbinden. Für die Triggerung ist eine Leitung vom frontseitigen Generator-Anschluss “MARKER 1“ zum rückseitigen Analysator-Anschluss “EXT TRIGGER / GATE IN“ anzulegen. Für eine Kabelübertragung sollte der Generator auf keinen höheren Pegel als -20 dBm eingestellt werden. Entsprechend ist Referenzpegel am Analysator anzupassen. Bei Antennenübertragungen können bis zu +15 dBm gewählt werden. Als Trägerfrequenz bzw. Centerfrequenz eignen sich 2,44 GHz, da diese Frequenz frei zur Verfügung steht. Die Symbolrate kann auf 1 MHz eingestellt werden. Die MATLAB-Skripte zur Datenübertragung sind nach Modulationsart sortiert und in einzelne Dateiodner im Überordner **AHaist\_Masterarbeit** gespeichert. Dieser befindet sich momentan auf dem Desktop. Der gewünschte Modulationsordner ist zu öffnen und die **Gesamtdatei** zu starten. Bei 16 QAM ist dies für die Übertragung vom MATLAB-Bildern die Datei **Gesamtdatei\_16QAM**. Es existieren für 16QAM noch weitere Varianten der Gesamtdatei, für spezielle Initialfolgen oder die Übertragung diverser Dateiformate. Im Skript sind am Anfang die gewünschten Sendeparameter wie Pegel usw. einzustellen. In der Zeile **Init\_Freq\_ext\_16QAM** wird festgelegt, dass eine externe Referenzfrequenz verwendet wird. Für eine interne Referenzfrequenz ist anstelle von “ext“ “int“ einzutragen. Mit Klick auf “Run“ (Dreieck) wird die Übertragung gestartet. Nach dem Start wird einige Sekunden eine Geräteinitialisierung durchgeführt. Danach wird das Bild auf den Symbolumfang der Konstellation umgerechnet. Erst danach erscheint das Übertragungsfenster. Der Berechnungsprozess kann abhängig der Modulationsart und der Bildgröße bis zu einer Minute oder mehr dauern. Sobald das Fenster erscheint, ist darauf zu achten, dass der Übertragungsstand hochzählt und im MATLAB Command Window keine Fehlermeldung zu einer inkorrekt übertragenen Initialfolge angezeigt wird. Tritt dieser Fehler ein, wird durch ständiges Wiederholen versucht, den ersten Abschnitt zu übertragen. Sollte dies nach mehrmaliger Fehleranzeige nicht gelingen, ist ein Programmabbruch zu empfehlen. Dafür ist auf “Pause“ und anschließend auf “Quit Debugging“ zu klicken. Falls sich ein zusätzliches Skript-Register dabei geöffnet hat, kann dieses geschlossen werden, um zur Ansicht der Gesamtdatei zurückzukehren. Nach Anpassung der Sendeparameter kann die Übertragung wiederholt werden.

Für die Übertragung anderer Dateiformate mit 16QAM ist die Datei **Gesamtdatei\_divDateitypen\_16QAM** zu öffnen. Oberhalb des Editor-Fensters in MATLAB werden 2 Pfade angezeigt. Der obere ist der Ausgabe-Pfad und der untere der Eingabepfad (siehe Abbildung 60, S. 92). Im Eingabepfad ist die zu übertragende Datei

zu speichern und im Skript unter der Variable `Dateiname` anzugeben. Im selben Ordner (Eingabe-Pfad) ist eine leere Datei gleichen Formats anzulegen. Es kann dafür die vorhandene Leerdatei `Empfangsdatei.txt` in ihrer Dateiendung (Dateityp) angepasst werden. Die Übertragung wird wieder mit Klick auf “Run“ gestartet. Im Kontrollfenster wird der Übertragungsstand angezeigt, jedoch keine Bilder. Nach Beendigung der Übertragung ist die Empfangsdatei im Ausgabe-Pfad zu finden.

## Danksagung

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Alles danke ich ganz herzlich für die kompetente Betreuung meiner Masterarbeit. Er ermöglichte mir die Bearbeitung eines sehr interessanten Themas und erbrachte mir wertvolle Unterstützung. Er vermittelte mir die notwendigen Kenntnisse in Theorie und Praxis. Im Verlauf der Arbeit unterstützte er mich mit neuen Ideen und gab Impulse für weitere inhaltliche Fragestellungen. Vor allem beim Umgang mit einem Gerätedefekt setzte er sich für einen reibungslosen und schnellen Ablauf der Reparatur ein. Hier bin ich ihm besonders dankbar, dass er auch eine Ausweidlösung geschaffen hat. Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Nikolas Akerblom für die Betreuung und Bewertung meiner Masterarbeit und für die Bereitschaft als Zweitkorrektor einzutreten. Außerdem möchte ich mich für die vielseitige Unterstützung von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Joachim Kircher bedanken. Er hat in vielen Situationen mir sehr gut geholfen. Insbesondere bedanke ich mich für seinen engagierten Einsatz bei der Geräte-reparatur.

# Quellen

- [1] [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/12/PD16\\_430\\_63931.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/12/PD16_430_63931.html), abgerufen am 31.10.18, 20:00
- [2] [https://de.wikibooks.org/wiki/Digitale\\_Schaltungstechnik/\\_Signallaufzeit/\\_Leitungen](https://de.wikibooks.org/wiki/Digitale_Schaltungstechnik/_Signallaufzeit/_Leitungen), abgerufen am 30.10.18, 20:08
- [3] <https://www.computerbild.de/artikel/cb-News-DSL-Internet-LTE-als-DSL-Ersatz-das-sollten-sie-wissen-21533331.html>, abgerufen am 30.10.18, 20:09
- [4] [https://de.wikipedia.org/wiki/Richtfunk#/media/File:Rifu\\_Basistation\\_2.tif](https://de.wikipedia.org/wiki/Richtfunk#/media/File:Rifu_Basistation_2.tif), abgerufen am 02.11.18, 20:15
- [5] Höher, Peter Adam: Grundlagen der digitalen Informationsübertragung – Von der Theorie zu Mobilfunkanwendungen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [6] Alles, Martin: Skript zur Vorlesung „Drahtlose Signalübertragung“, Hochschule Heilbronn, 2015
- [7] <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antennendipol.de.html>, abgerufen am 03.11.18, 10:50
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikrowellen>, abgerufen am 03.11.18, 10:55
- [9] <https://www.mathworks.com/help/instrument/tcpip.html>, abgerufen am 09.11.18, 19:00
- [10] <https://www.itwissen.info/Gray-Code-Gray-code.html>, abgerufen am 17.07.18, 13:24
- [11] Roth, Mario und Schmelzer, Steven: Untersuchung der Stabilität digitaler Modulationsverfahren, Master-Projektarbeit, Hochschule Heilbronn, 2016
- [12] McKinley, Michael D.: EVM Calculation for Broadband Modulated Signals, 64th ARFTG Conf. Dig., Orlando, 2004
- [13] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-2898E.pdf>, abgerufen am 08.07.2016, 11:00

- [14] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: R&S FSQ-K70/FSMR/FSU-B73 Vektorsignalanalyse: Softwarehandbuch, München, 2014
- [15] <https://www.keysight.com/en/pdx-x201910-pn-N5172B/exg-x-series-rf-vector-signal-generator-9-khz-to-6-ghz?cc=MY&lc=eng>, abgerufen am 02.11.18, 21:00
- [16] [https://www.rohde-schwarz.com/de/produkt/smj100a-produkt-startseite\\_63493-7560.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/produkt/smj100a-produkt-startseite_63493-7560.html), abgerufen am 02.11.18, 21:05
- [17] Keysight Technologies, Inc.: Keysight X-Series Signal Generators: Programming Guide, Santa Rosa, 2018
- [18] Keysight Technologies, Inc.: Keysight X-Series Signal Generators: Programming Compatibility Guide, Santa Rosa, 2018
- [19] Agilent Technologies, Inc.: Agilent X-Series Signal Generators: User's Guide, Santa Clara, 2013
- [20] Stahl, Volker: Übungen zu Signalverarbeitung 1, Blatt 5, Hochschule Heilbronn, 2017
- [21] Foschini, Gerard. J.; Gitlin, Richard D.; Weinstein, Stephen B.: Optimization of Two-Dimensional Signal- Constellations in the Presence of Gaussian Noise, in: IEEE Transactions and Communications, VOL. COM-22, NO. 1, Januar 1974, S. 28-38
- [22] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: R&S ARB Toolbox PC Software: User Manual, Version 3.6, München
- [23] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: R&S mapwiz: Mapping Editor for Rohde&Schwarz Signal and Spectrum Analyzers and Signal Generators, München, 2014
- [24] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: R&S filt wiz: Filter Editor for Rohde&Schwarz Signal and Spectrum Analyzers and Signal Generators, München, 2014
- [25] Freyer, Ulrich: Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Systeme der Telekommunikationstechnik, 6. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2009
- [26] [http://www.fastgraph.com/help/bmp\\_header\\_format.html](http://www.fastgraph.com/help/bmp_header_format.html), abgerufen am 13.11.18, 13:00



- [27] <https://de.wikipedia.org/wiki/JPEG>, abgerufen am 09.11.18, 19:15
- [28] Roelofs, Greg: PNG: The Definitive Guide, O'Reilly, Sebastopol, 1999
- [29] Wittenberg, Carsten: JPEG, Foliensammlung im Fach Datenkompression, Hochschule Heilbronn, 2018
- [30] <https://www.dateiendung.com/format/xlsx>, abgerufen am 07.10.18; 19:04
- [31] [https://de.wikipedia.org/wiki/CSV\\_\(Dateiformat\)](https://de.wikipedia.org/wiki/CSV_(Dateiformat)); abgerufen am 07.10.18 19:10
- [32] Karl-Dirk Kammeyer, Nachrichtenübertragung, 4. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008
- [33] Fischer, Walter: Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016
- [34] Vogel, Peter: Systemtheorie ohne Ballast, Springer, Berlin Heidelberg, 2011
- [35] <https://de.wikiversity.org/wiki/Gradientenabstiegsverfahren>, abgerufen am 08.11.18, 20:20
- [36] <https://www.greatbigcanvas.com/view/houses-chalets-and-church-of-the-village-of-hallstatt-salzkammergut-austria,2117831/?ref=recent>, abgerufen am 09.11.18, 18:50

**Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Heilbronn, November 2018

Alessandro Haist